

УДК 544.54:541.6

РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ В СТРУКТУРАХ DLC/ПОЛИИМИД ПРИ ОБЛУЧЕНИИ γ -КВАНТАМИ ^{60}Co

© 2022 г. А. А. Харченко^{a, *}, Ю. А. Федотова^a, И. А. Зур^{a, b}, Д. И. Бринкевич^{b, **},
С. Д. Бринкевич^{b, f}, Е. В. Гринюк^b, В. С. Просолович^b, С. А. Мовчан^c, Г. Е. Ремнев^d,
С. А. Линник^d, С. Б. Ластовский^e

^aНаучно-исследовательское учреждение “Институт ядерных проблем” Белорусского государственного университета (НИИ ЯП БГУ), ул. Бобруйская, 11, Минск, 220006 Республика Беларусь

^bБелорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, 220030 Республика Беларусь

^cОбъединенный институт ядерных исследований,

ул. Жолио-Кюри, 6, Дубна, Московская обл., 141980 Российская Федерация

^dНаучно-производственная лаборатория “Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий” Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), проспект Ленина, 30, Томск, 634050 Российская Федерация

^eНаучно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Республика Беларусь

^fООО МИГ Сколково Ядерная медицина, ул. Большая Академическая, д. 4, Москва, 127299 Российская Федерация

*E-mail: xaatm@mail.ru

**E-mail: brinkevich@bsu.by

Поступила в редакцию 25.04.2022 г.

После доработки 10.05.2022 г.

Принята к публикации 15.05.2022 г.

Методами измерения спектров пропускания и нарушенного полного внутреннего отражения исследованы облученные γ -квантами ^{60}Co дозой до 1 МГр структуры DLC/каптон. Показано, что существенные изменения спектров наблюдаются в области колебаний O–H, CH₂ и CH₃ связей, что обусловлено радиационно-индуцированными процессами на побочных продуктах синтеза полиимида, а также остаточных растворителях. Обнаружены существенные различия в радиационно-индуцированных процессах, протекающих в объеме и приповерхностной области полиимидной пленки и структур DLC/полиимид. В объеме полиимида после облучения появляются полосы, обусловленные асимметричными и симметричными колебаниями CH₃ группы. В приповерхностной области дополнительно наблюдались полосы, связанные с колебаниями CH₂ группы. В структурах DLC/полиимид образование CH₂ групп в приповерхностном слое при облучении было выражено сильнее, чем в полиимидных пленках, что обусловлено дополнительной подпиткой водородом из пленки DLC.

Ключевые слова: полиимид, алмазоподобные покрытия, спектр нарушенного полного внутреннего отражения, спектр поглощения, γ -облучение

DOI: 10.31857/S0023119322050059

ВВЕДЕНИЕ

Газовые электронные умножители (ГЭУ/gas electron multiplier GEM) представляют собой газовый детектор, состоящий из двух металлических слоев, разделенных тонким диэлектриком, с регулярной матрицей из открытых (газовых) каналов в диэлектрике между электродами. Такие детекторы обнаруживают рентгеновские лучи и заряженные частицы с хорошим пространственным разрешением. Преимуществом ГЭУ является более низкая стоимость по сравнению с полупроводниковым детектором того же размера, а также лучшее разрешение, чем в сцинтилляцион-

ных детекторах [1]. В настоящий момент ГЭУ широко используются в физике элементарных частиц и ядерной физике, радиологии, в приборах неразрушающего контроля [1–3].

В качестве диэлектрика ГЭУ детекторов используется полиимидная (каптоновая) подложка, в которой протравливается ряд сквозных отверстий диаметром 70 мкм с шагом 140 мкм [1]. Основным достоинством каптоновой подложки является хорошая радиационная стойкость [4, 5]. Однако высокая разность потенциалов, необходимая для достижения высоких коэффициентов усиления, может привести к необратимому по-

вреждению полиимидной подложки электрическим разрядом вследствие пробоя в области усиления, что приводит к ухудшению характеристик, вплоть до полного отказа прибора, а также к шунтированию контактов. Для решения данной проблемы перспективным подходом является использование резистивных электродов GEM (RE-GEM) [3], которые препятствуют развитию самоподдерживающегося разряда в газе. Наиболее приемлемым материалом при создании резистивных электродов для ГЭУ являются наноразмерные алмазоподобные покрытия (diamond-like carbon/DLC) [6].

В процессе эксплуатации ГЭУ подвергается воздействию излучения. Указанное обстоятельство обуславливает интерес к исследованию радиационной стойкости структур DLC/полиимид. Целью настоящей работы является изучение влияния гамма-излучения на структуру DLC/полиимид.

МЕТОДИКА

Слои DLC толщиной до 400 нм наносились на полиимидную пленку (каптон, толщина 200 мкм) методом сильноточного импульсного магнетронного распыления графита марки ГЛ-1 с параметрами магнетронного разряда: напряжение разряда 900 В, частота импульсов 3 кГц, длительность импульса 50 мкс, рабочий газ аргон, рабочее давление 2.7×10^{-3} Торр, смещение – плавающий потенциал. 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 течение 15 мин. Непосредственно перед напылением подложка очищалась потоком ионов аргона (Ar^+) с ускоряющим напряжением 3.5 кВ в течение 30 мин.

ИК-спектроскопия проводилась в двух режимах – пропускания через весь образец и измерения спектров нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Измерения в режиме пропускания регистрировались в виде спектров оптической плотности на спектрометре *Vertex 70* (Bruker Optik GmbH) в диапазоне от 4000 до 400 cm^{-1} , разрешение составляло менее 0.06 cm^{-1} . Следует отметить, что в связи с высокой интенсивностью поглощения полиимида в диапазоне волновых чисел 400–1800 cm^{-1} анализ спектров оптической плотности в этой области затруднен. Спектры НПВО измерялись при комнатной температуре спектрофотометром ALPNA (Bruker Optik GmbH) в диапазоне от 4000 до 1000 cm^{-1} с разрешением 2 cm^{-1} , количество сканов – 24. Отметим, что при измерении спектров НПВО глубина проникновения $d_{эф}$ светового луча в образец зависит от длины волны λ , показателей преломления призмы n_2 и

образца n_1 , угла падения α и в условиях нашего эксперимента составляла $d_{эф} \sim 0.5\lambda$ [7]. Для использовавшегося диапазона волновых чисел $d_{эф}$ варьировалось от 1 до 5 мкм. Таким образом, сопоставление спектров оптической плотности и НПВО позволяет проанализировать радиационно-индуцированные процессы как в объеме, так и в приповерхностных слоях.

Облучение полиимидных пленок и структур DLC/полиимид γ -квантами дозой до 1 МГр проводилось на установке МРХ- γ -25М с источником ^{60}Co при комнатной температуре и атмосферном давлении. Мощность поглощенной дозы составляла 0.12 ± 0.003 Гр/с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Спектры оптической плотности необлученных полиимида и структур DLC/полиимид практически совпадали. Единственное отличие – интенсивность максимумов 3560 и 3640 cm^{-1} в структурах DLC/полиимид была чуть выше, чем в полиимиде (рис. 1, кривые 1, 3). Однако наличие пленки DLC приводило к подъему фонового поглощения спектра НПВО усиливающегося с ростом толщины DLC пленки. При этом вид спектра (положение и интенсивность полос) существенным образом не изменялся (рис. 2, кривые 1, 3).

В диапазоне волновых чисел 1800–3700 cm^{-1} в спектрах оптической плотности наблюдался ряд полос (рис. 1 и табл. 1). Среди них две относительно сильные – полоса с тремя близко расположенными максимумами при 3030–3090 cm^{-1} , обусловленная валентными колебаниями С–Н связей [8], и полоса в диапазоне волновых чисел 3450–3700 cm^{-1} , характерном для О–Н связей. Полосы средней интенсивности с максимумами при ~1900, 1948 и 2014 cm^{-1} обусловлены, вероятнее всего, колебаниями С=О связи имидного цикла. Кроме того, в спектрах оптической плотности присутствовал ряд очень слабых полос в диапазоне волновых чисел 2350–2600 cm^{-1} и одиночная полоса с максимумом 2778 cm^{-1} (табл. 1).

Спектры НПВО имели ряд отличий от спектров оптической плотности, которые обусловлены спецификой приповерхностной области полиимида по сравнению с объемом (рис. 3). Так, в спектрах НПВО всех исследованных образцов отсутствовала полоса 2014 cm^{-1} и не проявлялись слабые полосы в диапазоне 2350–2600 cm^{-1} , вероятно, вследствие их низкой интенсивности. По сравнению со спектрами оптической плотности изменяется соотношение интенсивностей полос в области колебаний ароматических С–Н связей – растет интенсивность низкоэнергетичных максимумов 3037 и 3066 cm^{-1} по сравнению с максимумом

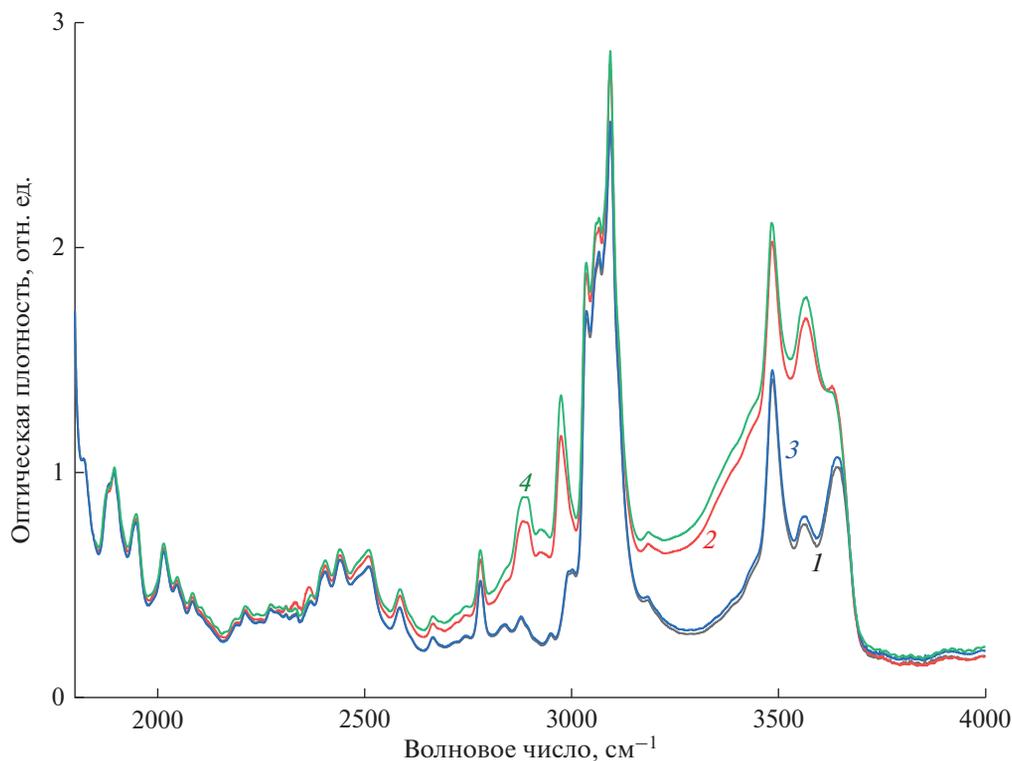


Рис. 1. Спектры оптической плотности исходных (1, 3) и облученных γ -квантами дозой 1 МГр (2, 4) пленок полиимида (1, 2) и структур DLC/полиимид (3, 4).

при 3094 см^{-1} . В спектрах НПВО необлученных структур DLC/полиимид дополнительно появляются полосы с максимумами при 2860 и 2930 см^{-1} , интенсивность которых выше интенсивности полосы 2778 см^{-1} . Отметим, что в спектрах оптической плотности наоборот – полоса 2778 см^{-1} имеет среднюю интенсивность, а полосы 2860 и 2930 см^{-1} едва заметны на фоне шумов (рис. 3). Следует отметить также сильную трансформацию структуры полосы в диапазоне волновых чисел $3450\text{--}3700\text{ см}^{-1}$, обусловленной O–H колебаниями. Так в спектре НПВО максимум 3660 см^{-1} указанной полосы практически отсутствует, в то время как в спектрах оптической плотности он ярко выражен (рис. 3).

После гамма-облучения как полиимида, так и структур DLC/полиимид наблюдался подъем фонового поглощения и усиление интенсивности линий поглощения в диапазоне волновых чисел $2500\text{--}3700\text{ см}^{-1}$ (рис. 1). Это характерно как для поглощения в объеме полимера (спектры оптической плотности), так и приповерхностного слоя (спектры НПВО) (рис. 3а, 3б). Однако в области волновых чисел ниже 2500 см^{-1} (колебания скелета ароматического кольца, имидного цикла и C–O связей) существенных изменений спектра не было отмечено.

Наибольшие изменения колебательного спектра после облучения наблюдались в области колебаний O–H и C–H связей (табл. 1). Так имела место трансформация структуры полосы $3450\text{--}3700\text{ см}^{-1}$ – падала интенсивность максимума при 3640 см^{-1} (он при дозе 1000 кГр вырождается до перегиба на высокоэнергетичном крыле полосы) при одновременном росте максимума при 3560 см^{-1} . Кроме того, в спектре оптической плотности γ -облученных ПИ и структур DLC/полиимид появляются интенсивные полосы с максимумами при 2877 и 2975 см^{-1} , которые в исходных образцах наблюдаются в виде перегибов (рис. 3). В этом диапазоне волновых чисел наблюдаются ассиметричные и симметричные валентные колебания CH_3 связей. Структура и интенсивность полосы при $3030\text{--}3090\text{ см}^{-1}$, обусловленной валентными колебаниями ароматических C–H связей, после облучения практически не изменяется.

В диапазоне волновых чисел $2800\text{--}3000\text{ см}^{-1}$ (область колебаний C–H связей) наблюдались существенные различия в радиационно-индуцированных процессах, протекающих в объеме и приповерхностной области полиимидной пленки и структур DLC/полиимид. Так, в спектрах оптической плотности, которые, как отмечено выше, обусловлены поглощением в объеме полиимидной пленки, после облучения появляются полосы

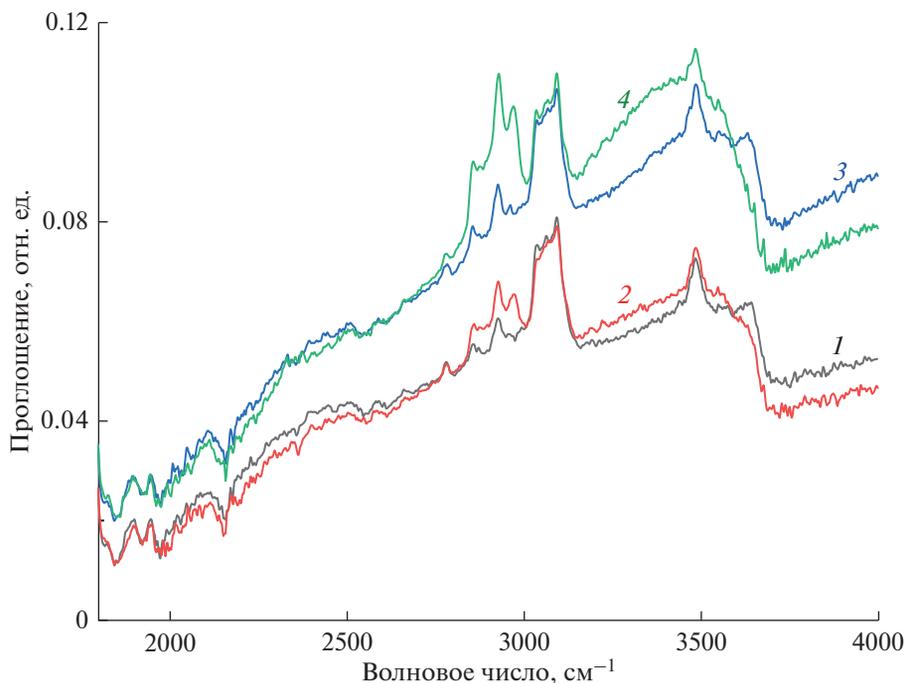


Рис. 2. Спектры НПВО исходных (1, 3) и облученных γ -квантами дозой 1 МГр (2, 4) пленок полиимида (1, 2) и структур DLC/полиимид (3, 4).

с максимумами при 2975 и 2877 cm^{-1} (табл. 1), обусловленные асимметричными и симметричными колебаниями CH_3 связей [7, 8]. Отметим, что до облучения интенсивность этих полос находилась на уровне шумов (рис. 3). С другой стороны, в спектре НПВО, обусловленном поглощением в приповерхностном слое полиимида, после облучения появляется широкая полоса с тремя максимумами при 2855, 2925 и 2975 cm^{-1} (рис. 2, табл. 1). Отметим, что доминирующей среди них является полоса с максимумом при 2925 cm^{-1} , обусловленная асимметричными валентными колебаниями CH_2 связей. Интенсивность связанной с колебаниями CH_3 связей полосы с максимумом при 2975 cm^{-1} , доминирующей в спектре поглощения, была почти в два раза ниже, чем интенсивность полосы при 2925 cm^{-1} . Кроме того, энергетическое положение полосы симметричных валентных колебаний $\text{C}-\text{H}$ в спектрах НПВО (2855 cm^{-1}) на 20 cm^{-1} ниже, чем аналогичной полосы (2877 cm^{-1}) в спектрах поглощения (табл. 1).

В структурах DLC/полиимид радиационно-индуцированные изменения были выражены сильнее, чем в полиимиде. Наиболее ярко это проявлялось в спектрах НПВО, т.е. в приповерхностном слое. Подъем фона в спектрах НПВО структур DLC/полиимид был выражен сильнее, чем в ПИ (сравни рис. 3а и 3б). У полосы в диапазоне волновых чисел 3450–3700 cm^{-1} после облучения появляется сильное низкоэнергетичное

крыло (рис. 3б) при одновременном уменьшении высокоэнергетичного крыла. Это обусловлено исчезновением после облучения максимума при 3640 cm^{-1} . С другой стороны, интенсивность радиационно-индуцированных полос в диапазоне волновых чисел 2800–3000 cm^{-1} , обусловленных колебаниями CH_2 и CH_3 связей, в структурах DLC/полиимид была существенно выше, чем в ПИ (рис. 3а, 3б). Интенсивность указанных полос в структурах DLC/полиимид даже превышала интенсивность полосы при 3030–3090 cm^{-1} , обусловленной валентными колебаниями ароматических $\text{C}-\text{H}$ связей (рис. 3б).

Резюмируя экспериментальные результаты, полученные после облучения γ -квантами ^{60}Co дозой 1 МГр структур DLC/полиимид можно отметить следующее:

- заметного снижения интенсивности полос поглощения, обусловленных колебаниями скелета ароматического кольца, имидного цикла, ароматических $\text{C}-\text{H}$ связей и имидных $\text{C}=\text{O}$ связей отмечено не было;

- существенные изменения колебательного спектра после облучения наблюдались в области колебаний OH , CH_2 и CH_3 связей. Вероятнее всего, это обусловлено радиационно-индуцированными процессами на побочных продуктах синтеза (в том числе продуктах неполного замещения) полиимида, примесях и остаточных растворителях. Об этом свидетельствует снижение в процес-

Таблица 1. Экспериментальные значения частот ИК-поглощения функциональных групп в структурах DLC/полиимид

Энергетическое положение, см ⁻¹	Вид спектра	Интенсивность	Функциональная группа, тип колебаний	Изменение после облучения
1894 1900	Т НПВО	Средняя	C=O валентные имидного цикла [9]	Нет
1948		Средняя		
2014	Т	Средняя		
2046	Т	Слабая	ν –N=C [8]	Нет
2370	Т	Слабая	–C= N [8]	Нет
2404	Т	Слабая	–C= N [8]	Нет
2440	Т	Слабая	–N=C=O [8]	Нет
2510	Т	Слабая	–	Нет
2585	Т	Слабая	–	Нет
~2778	Т НПВО	Средняя	N–CH ₃ [8]	Снижение интенсивности
2877 2855	Т НПВО	Слабая	Симметричные валентные колебания CH ₂ и CH ₃ групп [10]	Увеличение интенсивности
2925	НПВО	Средняя	Ассиметричные валентные колебания CH ₂ групп [7, 8]	НПВО сильный рост
2975	Т НПВО	Слабая	Ассиметричные валентные колебания CH ₃ групп [7, 8]	Появление полосы средней интенсивности
3037 3066 3094	Т НПВО	Сильная	C–H валентные ароматического кольца [11]	Т: Повышение фона
3485	Т НПВО	Сильная	Валентные O–H [12, 13] валентные N–H [11]	Сильное увеличение интенсивности
3566	Т НПВО	Сильная	O–H валентные водородная связь [13]	Увеличение интенсивности
3647	Т НПВО	Сильная	O–H свободные [13]	Ослабление интенсивности. В НПВО сильное

Примечание. Т – спектр оптической плотности. НПВО – спектр нарушенного полного внутреннего отражения.

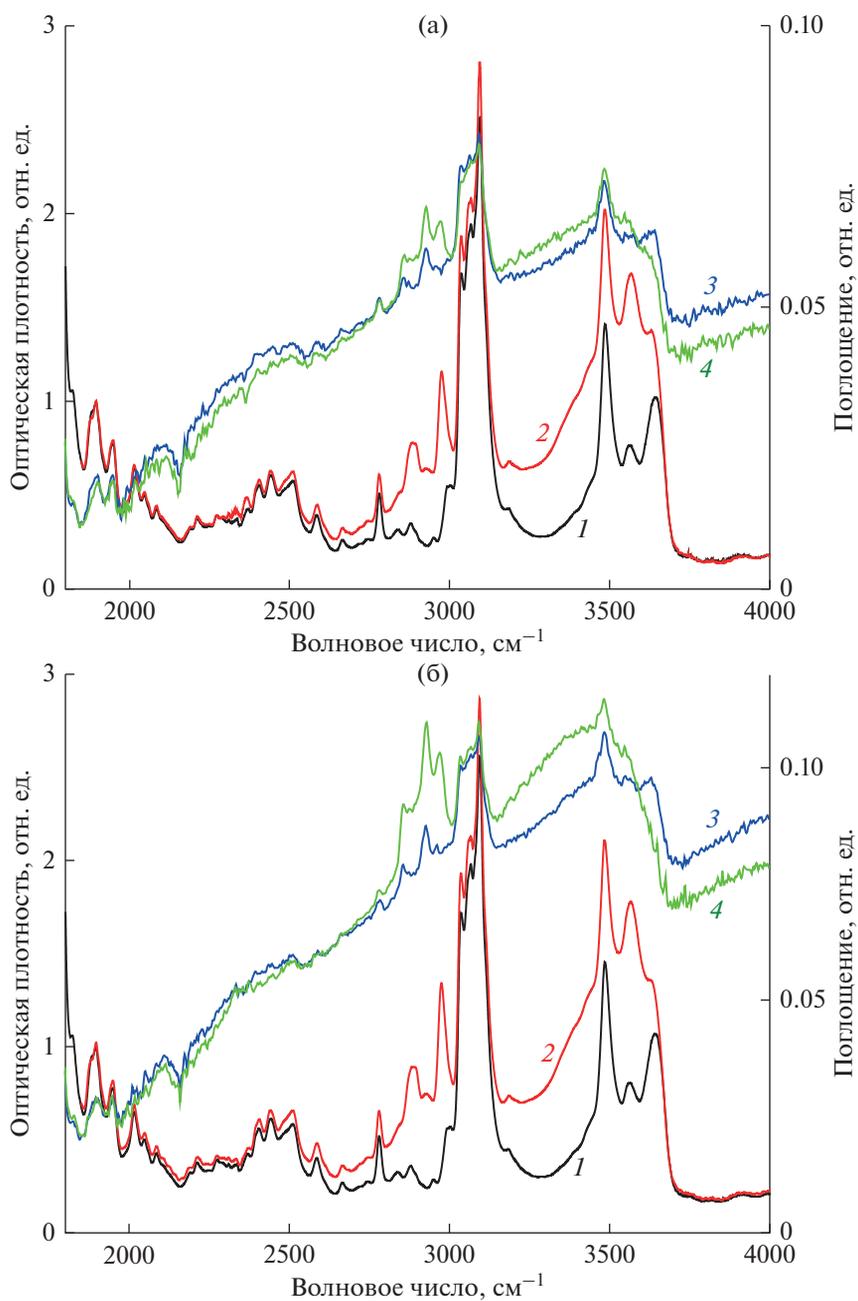


Рис. 3. Спектры оптической плотности (1, 2 – левая ось) и НРВО (3, 4 – правая ось) пленок полиимида (а) и структур DLC/полиимид (б) до (1, 3) и после облучения дозой 1 МГр (2, 4).

се облучения интенсивности полосы с максимумом $\sim 2778 \text{ см}^{-1}$, обусловленной колебаниями остаточного растворителя NN-диметилацетдиамида (табл. 1);

– наблюдались существенные различия в радиационно-индуцированных процессах, протекающих в объеме и приповерхностной области полиимидной пленки и структур DLC/полиимид. В объеме полиимида появляются полосы, обу-

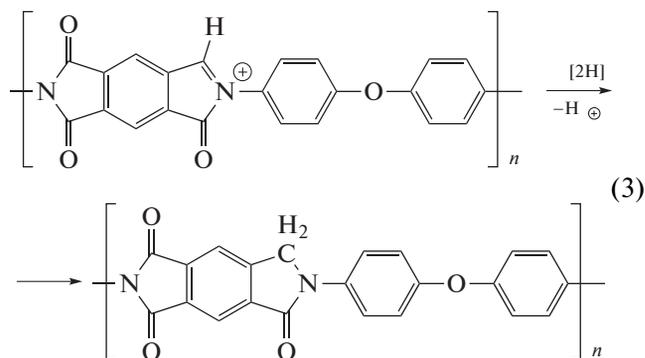
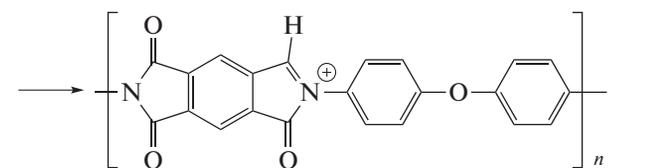
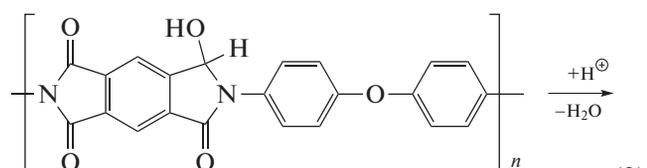
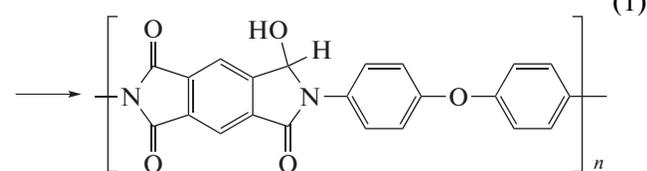
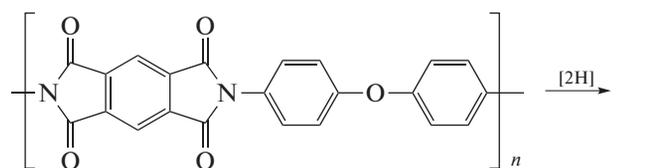
словленные асимметричными и симметричными колебаниями CH_3 . С другой стороны, в приповерхностной области дополнительно наблюдались и были доминирующими полосы, связанные с колебаниями CH_2 ;

– в структурах DLC/полиимид радиационно-индуцированные изменения (особенно формирование CH_2 групп) в приповерхностном слое

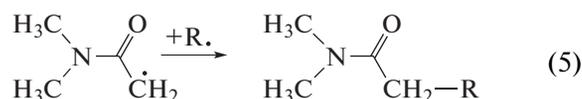
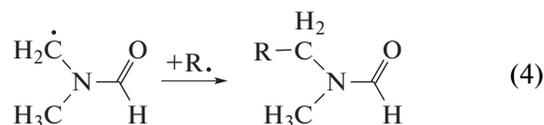
были выражены сильнее, чем в полиимидных пленках.

Накопление в процессе облучения CH_2 групп в приповерхностной области полиимида может протекать вследствие восстановления амидных групп в 3 этапа согласно реакциям (1)–(3). На первой стадии в процессе осаждения углеродного слоя на полимерную подложку, вероятно, происходит восстановление карбонильной группы до гидроксильной по реакции (1). В дальнейшем, вследствие разогрева может происходить отщепление воды с образованием кратной связи $>\text{C}=\text{N}-$ согласно реакции (2). На заключительной стадии в результате присоединения атомов водорода или электронов будет происходить обрыв кратной связи с образованием $-\text{CH}_2-$ группы (реакция (3)). Источником водорода, необходимого для протекания реакций (1) и (3), выступают в основном растворители, используемые при очистке поверхности пленки перед нанесением пленки DLC, а также химические примеси.

Дополнительным источником H_2 может являться пленка DLC, в которой согласно оценке, полученной по измерениям спектра комбинационного рассеяния, концентрация водорода (в форме различных органических соединений) достигает 10%. Поэтому в структурах DLC/полиимид радиационно-индуцированное накопление CH_2 групп было выражено сильнее, чем в полиимидных пленках.



Еще одним источником образования $-\text{CH}_2-$ могут быть реакции с участием растворителей, которые в небольших количествах присутствуют в пленке полиимида. Например, NN-диметилформамид или NN-диметилацетамид могут в процессе облучения давать метильные радикалы, в результате рекомбинации которых по реакциям (4) и (5) будут образовываться новые метиленовые группы.



Образование при облучении $-\text{CH}_3$ групп в объеме полиимидной пленки обусловлено радиационно-индуцированными процессами только с участием остаточных растворителей, поскольку маловероятным выглядит возможность образования таких структур при радиолитическом или термическом разложении полиимида.

В процессе синтеза полиимида марки каптон (реакция (6)) для растворения диамина обычно используется диметилацетамид или диметилформамид. В спектрах исходных пленок полиимида до облучения присутствует хорошо выраженная полоса $\sim 2778 \text{ см}^{-1}$, обусловленная колебаниями группы $\text{N}-\text{CH}_3$ и ряд слабых полос, связываемых с колебаниями связи $-\text{N}-\text{C}$. Наличие этих полос, вероятнее всего, связано с присутствием в полиимидной пленке примесей остаточных растворителей (диметилацетамид, диметилформамид), побочных продуктов взаимодействия пиромеллитового ангидрида с диаминодифениловым эфиром.

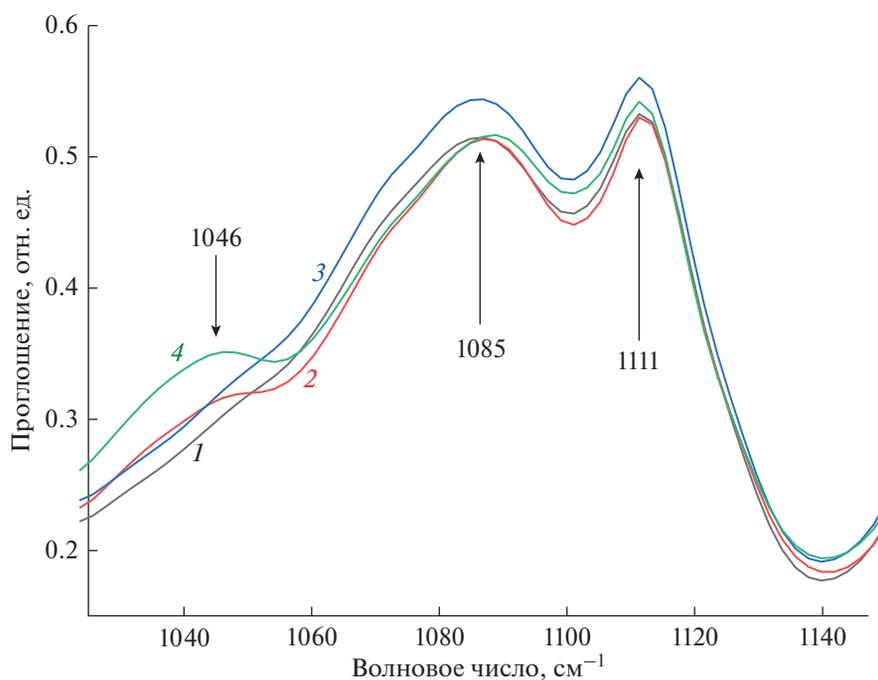
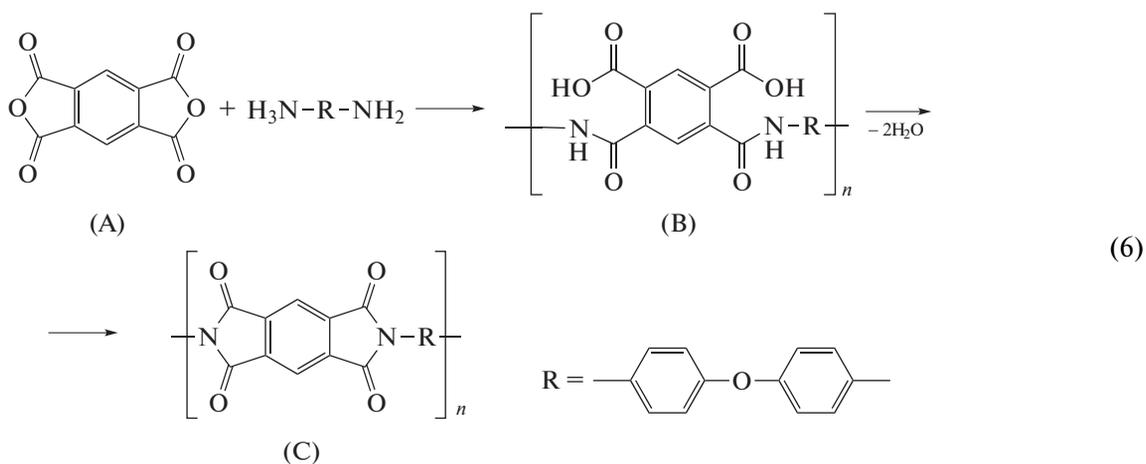


Рис. 4. Спектры НПВО пленок полиимида (1, 2) и структур DLC/полиимид (3, 4) до (1, 3) и после (2, 4) облучения дозой 1 МГр (2, 4).



Это является прямым указанием на присутствие остаточного растворителя – диметилацетамида. При формировании слоя DLC на полиимидной пленке интенсивность этой полосы не изменяется (рис. 1, кривые 1, 2). Однако при облучении интенсивность полосы $\sim 2778\text{ см}^{-1}$, связанной с остаточным растворителем, снижается синхронно с ростом интенсивности полосы с максимумом при 2975 см^{-1} , обусловленной антисимметричными валентными колебаниями CH_3 связей.

По данным [14] основными продуктами радиолиза чистого NN-диметилформаида являются

диметиламин и метан с выходами 2.6 и 0.93 частиц/100 эВ соответственно. Для NN-диметилацетамида выход метана можно ожидать еще выше. Несмотря на то, что содержание остаточных растворителей в полимере значительно меньше, чем макромолекул полиамида, возможно достаточно селективное разложение примеси в силу ее значительно более низкой радиационной стойкости и возможности передачи энергии возбуждения по макромолекулярным цепочкам.

Радиационно-индуцированная модификация спектра в области колебаний O–H связей (диапазон волновых чисел $3300\text{--}3700\text{ см}^{-1}$) обусловлена

следующими причинами. Вода изначально есть в пленке полиимида, поскольку его синтез (реакция (6)) происходит с выделением воды. С наличием воды связаны три достаточно интенсивные полосы с максимумами 3485, 3560 и 3640 см^{-1} . Более высокоэнергетичная полоса с максимумом при 3640 см^{-1} обусловлена колебаниями свободных О–Н связей. Снижение ее интенсивности вплоть до исчезновения из спектра НПВО после облучения обусловлено взаимодействием аккумулярованной воды с матрицей (полиимидом) с образованием водородных связей. На это указывает рост интенсивности более низкоэнергетичных полос с максимумами при 3485 и 3560 см^{-1} , обусловленных валентными колебаниями связанных водородной связью О–Н групп (табл. 1). Водородная связь, вероятнее всего, формируется с мостиковым кислородом (между бензольными кольцами). На это указывает появление после облучения слабой полосы с максимумом при 1046 см^{-1} на фоне полосы при 1085 см^{-1} , обусловленной колебаниями С–О связей (рис. 4). Сильный рост в процессе облучения полос колебаний О–Н связей во многом обусловлен образованием молекул воды, например, вследствие протекания реакции (2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После облучения γ -квантами ^{60}Co дозой 1 МГр структур DLC/полиимид существенные изменения спектров оптической плотности и НПВО наблюдались в области колебаний ОН, CH_2 и CH_3 связей, что обусловлено радиационно-индуцированными процессами на побочных продуктах синтеза полиимида, а также остаточных растворителей. Заметного снижения интенсивности полос поглощения, обусловленных колебаниями скелета ароматического кольца, имидного цикла, ароматических С–Н связей и имидных С=О связей не наблюдалось. Имели место существенные различия в радиационно-индуцированных процессах, протекающих в объеме и приповерхностной области полиимидной пленки и структур DLC/полиимид. В объеме полиимида после облучения появляются полосы, обусловленные асимметричными и симметричными колебаниями CH_3 группы. С другой стороны, в приповерхностной области дополнительно наблюдались и были доминирующими полосы, связанные колебаниями CH_2 группы. В структурах DLC/полиимид образование CH_2 групп в приповерхностном слое при облучении было выражено сильнее, чем в полиимидных пленках, что обусловлено дополнительной подпиткой водородом из пленки DLC.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа финансировалась в рамках контракта № 08626319/211293539-74 от 15.12.2021 г. с Объединенным институтом ядерных исследований (Россия) и в государственной программы научных исследований Республики Беларусь “ГПНИ “Фотоника и электроника для инноваций”, 2021–2025 годы”, “Микро- и наноэлектроника”) № ГР20212560.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sauli F.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1997. V. 386. № 2–3. P. 531. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)01172-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(96)01172-2)
2. *Breskin A., Alon R., Cortesi M., Chechik R., Miyamoto J., Dangendorf V., Maia J., Dos Santos J. M.F.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2009. V. 598. P. 107. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.08.062>
3. *Yoshikawa A., Tamagawa T., Iwahashi T., Asami F., Takeuchi Y., Hayato A., Hamagaki H., Gunji T., Akimoto R., Nukariya A., Hayashi S., Ueno K., Ochi A., Oliveira R.* // Journal of Instrumentation. 2012. V. 7. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/7/06/C06006>.
4. *Харченко А.А., Бринкевич Д.И., Бринкевич С.Д., Лукашевич М.Г., Оджаев В.Б.* Поверхность. рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 1. С. 94. (*Kharchenko A.A., Brinkevich D.I., Brinkevich S.D., Lukashevich M.G., Odzhaev V.B.* // J. of Surface Investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques. 2015. V. 9. № 1. P. 87. <https://doi.org/10.1134/S1027451015010103> <https://doi.org/10.7868/S0207352815010102>
5. *Бринкевич Д.И., Харченко А.А., Бринкевич С.Д., Лукашевич М.Г., Оджаев В.Б., Валеев В.Ф., Нүзджин В.И., Хайбуллин Р.И.* // Поверхность. Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 8. С. 17. (*Brinkevich D.I., Kharchenko A.A., Brinkevich S.D., Lukashevich M.G., Odzhaev V.B., Valeev V.F., Nuzhdin V.I., Khaibullin R.I.* // J. of Surface Investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques. 2017. V. 11. № 4. P. 801. <https://doi.org/10.1134/S1027451017040188> <https://doi.org/10.7868/S0207352817080029>
6. *Bencivenni G., Oliveira R.De, Felici G., Gatta M., Morello G., Ochi A., Poli Lener M., Tskhadadze E.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2018. V. 886. P. 36. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.12.037>
7. *Бринкевич С.Д., Гринюк Е.В., Бринкевич Д.И., Просолович В.С.* // Химия высоких энергий. 2020. Т. 4. № 5. С. 377. (*Brinkevich S.D., Grinyuk E.V., Brinkevich D.I., Prosolovich V.S.* // High Energy Chemistry. 2020. V. 54. № 5. P. 342.

- <https://doi.org/10.1134/S0018143920050045>
<https://doi.org/10.31857/S0023119320050046>
8. *Тарасевич Б.Н.* ИК спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. М: МГУ. 2012.
 9. *Tai H., Nishikawa K., Inoue S., Higuchi Y., Hirota Sh.* // J. Phys. Chem. B. 2015. V. 119. № 43. P. 3668.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b03075>
 10. *Hossain I., Al Munsur A.Z., Kim T.-H.* // Membranes. V. 2019. № 9. P. 113.
<https://doi.org/10.3390/membranes9090113>
 11. *Ortelli E.E., Geiger F., Lippert T., Wei J., Wokaun A.* // Macromolecules. 2000. V. 33. № 14. P. 5090.
<https://doi.org/10.1021/ma000389a>
 12. *Kizil H., Pehlivaner M.O., Trabzon L.* // Advanced Materials Research. 2014. V. 970. P. 132.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.970.132>
 13. *Musto P., Ragosta G., Mensitieri G., Lavorgna M.* // Macromolecules. 2007. V. 40. № 26. P. 9614.
<https://doi.org/10.1021/ma071385>
 14. *Лукаев А.К.* Современная радиационная химия. Радиолиз газов и жидкостей. М.: Наука, 1986. 440 с.