

## МОДИФИКАЦИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПЛЕНОК ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ $\gamma$ -КВАНТАМИ

Transmission and reflection spectra of thin polyethyleneterephthalate films irradiated by  $\gamma$ -rays up to 2900 kGy have been investigated. The modification of near-surface region with thickness of  $1,28 \div 1,7 \mu\text{m}$  have been obtained. Refraction index of modified layer changes in the range of  $1,35 \div 1,56$  depending on the fluence.

Радиационное повреждение различных полимеров ионами, высокоэнергетичными нейтронами или фотонами представляет интерес как с научной, так и с практической точки зрения. Теоретические усилия в основном направлены на установление относительного вклада разрыва или сшивки молекулярной цепочки в процессе облучения и детализации механизмов повреждения. Практический интерес в первую очередь обусловлен вопросами утилизации и ряда применений модифицированных полимерных материалов в электронной и оптической промышленности. Проведенные исследования модификации свойств полимерных пленок низкоэнергетичной имплантацией ионами газов, легких и тяжелых металлов показали высокую эффективность изменения их электрофизических характеристик [1, 2]. Эти изменения в основном вызываются карбонизацией полимера, т. е. формированием углеродной фазы, а также зарождением, ростом и агломерацией металлических включений в приповерхностном слое облучаемой полимерной пленки при имплантации ионами металлов.

Ранее нами было показано [3], что при имплантации ионов металла модифицируется не только приповерхностный слой облучаемой стороны пленки на длине пробега ионов, но и ее обратная сторона, т. е. на глубине, большей проецированного пробега имплантируемых ионов. В этой связи возник интерес к исследованию взаимодействия  $\gamma$ -квантов с полимерной пленкой в широком интервале доз, при котором радиационному воздействию облучения подвергается пленка по всей толщине, а внедрения инородных атомов не производится. При таком облучении также исключается локальный разогрев пленки, который непременно сопутствует ионной имплантации. Влияние  $\gamma$ -излучения на оптические свойства полиэтилентерефталата рассмотрено в [4], где показано, что кристаллическая структура при  $\gamma$ -облучении практически не изменяется, в то время как оптическое поглощение возрастает и наблюдается красное смещение в области основного поглощения, что связано с увеличением числа свободных радикалов. Однако вопросы изменения оптических характеристик по глубине пленки не рассматривались. В этой связи основная цель работы заключалась в следующем: выяснить, модифицируется ли при радиационной обработке полимерная пленка по всей глубине или только ее приповерхностная область.

### Методика эксперимента

Облучение пленок полиэтилентерефталата (ПЭТФ) толщиной 60 мкм проводилось на установке МРХ- $\gamma$ -25М с источником  $^{60}\text{Co}$ . Мощность поглощенной дозы составляла  $0,36 \pm 0,008 \text{ Гр/с}$ . Интервал поглощенных доз  $6 \div 2900 \text{ кГр}$ .

Спектральные зависимости отражения и пропускания регистрировались в диапазоне длин волн  $\lambda = 190 \div 1100 \text{ нм}$  при комнатной температуре на спектрофотометре PROSKAN MS-122 при падении света как на облучаемую, так и на необлучаемую (обратную) поверхность полимерной пленки.

### Результаты и их обсуждение

Как уже отмечалось, при имплантации низкоэнергетичных ионов металла в полимерные пленки наблюдается модификация их оптических свойств не только на длине пробега имплантируемых ионов, но и с обратной неимплантированной стороны, которая может быть вызвана нагревом полимерной мишени в процессе имплантации [3]. При облучении  $\gamma$ -квантами такой процесс практически исключен и следует ожидать модификации пленки по всей толщине.

На рис. 1 а показаны характерные для падения света на облученную и необлученную поверхности спектральные зависимости пропускания исходной (кривая 1) и облученных разными дозами  $\gamma$ -квантов (кривые 2–4) пленок ПЭТФ. Видно, что в исходном образце и при малых дозах край пропускания находится при  $\lambda \approx 260 \text{ нм}$ . В отличие от [4], где наблюдалось постепенное смещение в длинноволновую область края пропускания при наборе дозы до 100 кГр, в наших образцах красное смещение до  $\Delta\lambda \approx 40 \text{ нм}$  наблюдалось только для максимальной дозы облучения 2900 кГр (кривая 4). Видно также, что в области прозрачности пропускание исходного образца монотонно увеличивается с ростом длины волны и при  $\lambda > 800 \text{ нм}$  отчетливо наблюдается интерференционная картина

в результате отражения от верхней и нижней границ пленки. Такая же интерференция характерна и для облученных образцов, для которых, кроме того, наблюдаются интерференционные максимумы с другим периодом и при меньших длинах волн (кривые 2–4).

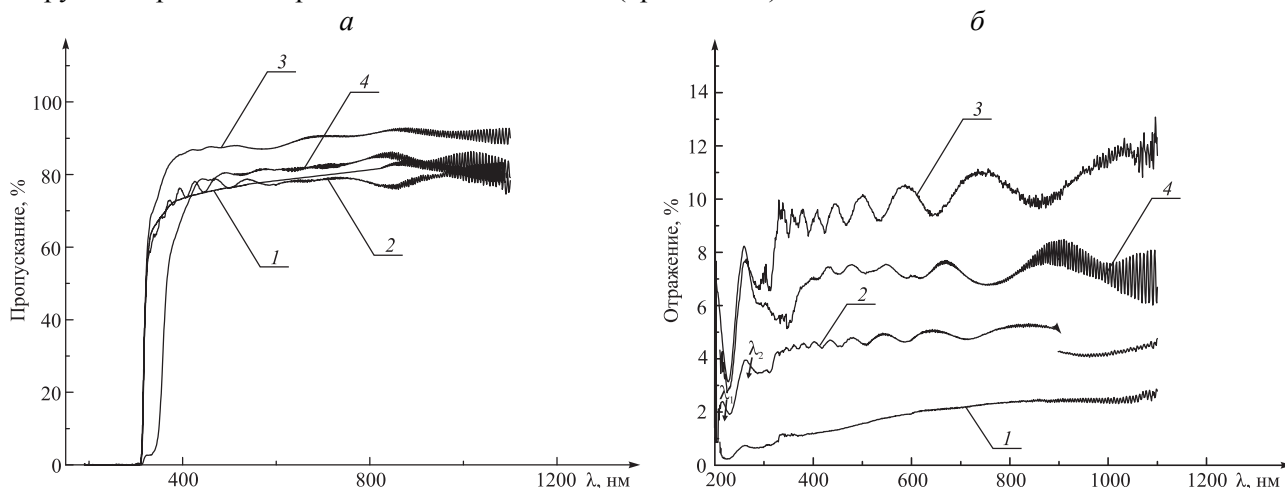


Рис. 1. Спектральная зависимость пропускания (а) и отражения (б) исходной (1) и облученных  $\gamma$ -квантами (2–4) пленок ПЭТФ. Доза, кГр: 2 – 6; 3 – 44,8; 4 – 2900

Спектральная зависимость отражения тех же образцов показана на рис. 1 б. В отличие от имплантации ионов металлов в полимерные пленки [3] спектральные зависимости отражения не связаны со стороной, на которую падает свет. В исходном образце наблюдается две слабо выраженные полосы отражения с максимумами при  $\lambda_1 = 205$  и  $\lambda_2 = 260$  нм, обусловленные переходом  $\pi$ -электронов в возбужденное состояние. Так же как и при имплантации ионов серебра в полиимид [3], при которой наблюдалось усиление полос в УФ-области при падении света только на неимплантированную сторону, в случае облучения ПЭТФ  $\gamma$ -квантами усиление полос в УФ-области наблюдается при падении света как на облученную, так и на необлученную поверхность. Это свидетельствует о модификации структуры приповерхностных слоев на молекулярном уровне с обеих сторон облучаемой пленки.

На длинах волн более 400 нм коэффициент отражения монотонно увеличивается и при  $\lambda > 800$  нм на его спектральной зависимости отчетливо проявляется интерференционная картина от полимерной пленки. Так же как и на спектральной зависимости пропускания, для облученных образцов характерно наблюдение интерференционной картины во всей области прозрачности ПЭТФ ( $\lambda \approx 300\div 1100$  нм), на которую накладывается интерференция от самой пленки при  $\lambda > 800$  нм. Последнее однозначно свидетельствует о возникновении слоистой неоднородности в облученной пленке, т. е. о появлении приповерхностных модифицированных слоев с отличающимися от объема пленки показателями преломления.

Положения интерференционных максимумов (или минимумов)  $E_m$  для однородных планарных слоев являются эквидистантными по энергии, и их определение в зависимости от номера максимума дает возможность по наклону определить оптическую толщину модифицированных слоев на основе формулы [5]:

$$E_m = \frac{hc}{2dn} m = E_0 m, \quad (1)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме,  $d$  – оптическая толщина,  $n$  – коэффициент преломления,  $m$  – порядок интерференции.

Соответствующие зависимости для исходного и облученных образцов от порядкового номера наблюдаемого на эксперименте максимума  $m^*$  в случае пропускания и отражения и их аппроксимация линейной зависимостью показаны на рис. 2, а определенная оптическая толщина исходной (1) и модифицированных слоев (2–4) приведена в таблице. Несмотря на то что порядок интерференции в формуле (1) может отличаться от  $m^*$ , тем не менее наклон зависимости  $E_0$  не изменяется, что позволяет найти оптическую разность хода интерферирующих лучей.

Для определения показателя преломления и толщины модифицированных приповерхностных слоев проведем моделирование прохождения света через трехслойную структуру (модифицированные приповерхностные слои с обеих сторон пленки и центральная часть) с учетом отражений и вариаций

коэффициентов отражения и поглощения слоев до совпадения с экспериментальными данными для всего образца на длине волны  $\lambda = 620$  нм. При этом принималось во внимание сложение отраженных волн с учетом сдвига фаз от четырех границ без учета поглощения. Детали процедуры численного моделирования подробно описаны в предыдущей статье авторов [6]. Коэффициенты отражения от поверхности исходной пленки и модифицированных слоев, полученные таким способом, приведены в таблице. Из значений данных коэффициентов и формулы Френеля  $R = (n-1)^2/(n+1)^2$  (поглощение в слоях несущественно и не влияет на коэффициент отражения, поэтому формулу Бера можно не использовать) получены значения показателей преломления модифицированных слоев, которые также содержатся в таблице. Согласно анализу интерференционных полос и моделирования значения коэффициента отражения исходного образца его показатель преломления составил  $n = 1,27$ .

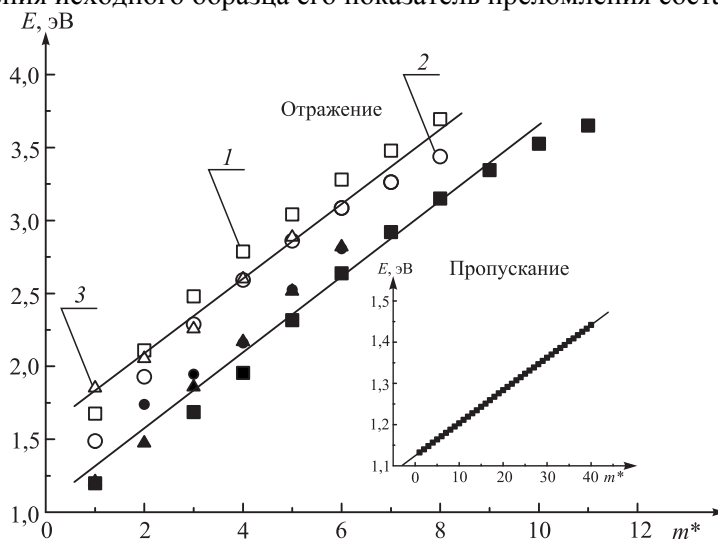


Рис. 2. Зависимость положения максимумов интерференции от порядкового номера, наблюдавшегося на эксперименте максимума  $m^*$  для облученных пленок ПЭТФ. Доза, кГр: 1 – 6; 2 – 44,8; 3 – 2900. На вставке также зависимость для исходного образца

Из полученных значений показателя преломления  $n$  и величин оптической толщины модифицированных слоев определена их геометрическая толщина, которая изменяется в интервале  $1,28 \div 1,74$  мкм (см. таблицу). Такой разброс значений обусловлен нелинейностью зависимостей  $E_m$  от  $m$ , что может быть связано как с неоднородностью показателя преломления, непланарностью модифицированных слоев, так и, возможно, с дисперсией.

#### Оптическая и геометрическая толщины и показатель преломления модифицированных $\gamma$ -квантами пленок ПЭТФ

| Образец | Доза облучения, кГр | Оптическая толщина, мкм | Коэффициент отражения, % | Показатель преломления | Толщина модифицированного слоя, мкм |
|---------|---------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| 1       | Исходный            | 78,3                    | 1,4                      | 1,27                   | —                                   |
| 2       | 6                   | $2,27 \div 2,41$        | 4,8                      | 1,56                   | $1,44 \div 1,55$                    |
| 3       | 44                  | $2,27 \div 2,25$        | 2,2                      | 1,35                   | $1,68 \div 1,74$                    |
| 4       | 2900                | $1,89 \div 2,37$        | 3,7                      | 1,48                   | $1,28 \div 1,61$                    |

Таким образом, при облучении  $\gamma$ -квантами пленок полиэтилентерефталата происходит модификация структуры тонких приповерхностных слоев пленки, проявляющаяся в возникновении интерференционной картины на спектрах пропускания и отражения в диапазоне длин волн  $300 \div 1100$  нм. При этом толщина модифицированного слоя составляет  $1,4 \div 1,7$  мкм, а показатель преломления слоя изменяется в диапазоне  $1,55 \div 1,48$  в зависимости от дозы облучения. Показано, что усиление интенсивности полос отражения при  $\lambda_1 = 205$  и  $\lambda_2 = 260$  нм наблюдается при падении света как на облученную, так и на необлученную сторону. При дозе 2900 кГр наблюдается смещение края пропускания в область больших длин волн.

1. Оджаев В. Б., Козлов И. П., Попок В. П., Свиридов Д. В. Ионная имплантация полимеров. Минск, 1998.
2. Ророк V. N. // Rev. Adv. Mater. Sci. 2012. Vol. 30. № 1. P. 1.
3. Бумай Ю. А., Валеев В. Ф., Долгих Н. И. и др. // Материалы, технологии, инструменты. 2010. Т. 15. № 4. С. 54.
4. Prasad S., De A., De U. // J. of Spectroscopy. 2011. Vol. 3. № 11. P. 1.

5. Поль Р. В. Оптика и атомная физика. М., 1966.

6. Бумай Ю. А., Волобуев В. С. и др. // Журн. прикл. спектроскопии. 2012. Т. 79. № 5. С. 781.

Поступила в редакцию 21.05.12.

**Юрий Александрович Бумай** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экспериментальной и теоретической физики БНТУ.

**Дмитрий Иванович Бринкевич** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры физики полупроводников и наноэлектроники.

**Влас Сергеевич Волобуев** – младший научный сотрудник кафедры физики полупроводников и наноэлектроники.

**Наталья Ивановна Долгих** – кандидат физико-математических наук, заведующая учебной лабораторией кафедры физики полупроводников и наноэлектроники.

**Игорь Александрович Карпович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники.

**Михаил Григорьевич Лукашевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники.

УДК 004.056: 061.068

*А. В. СИДОРЕНКО, И. В. ШАКИНКО, К. С. МУЛЯРЧИК*

## О ПРЕОБРАЗОВАНИИ МЕТОДОМ СИНГУЛЯРНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ЗАШИФРОВАННЫХ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ХАОСА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

The operation evaluation problem for the encipher information based on the dynamic chaos is considered using the singular spectral analysis method. The numerical and qualitative results are given to illustrate this approach.

Современные информационные технологии находят все более широкое применение в телекоммуникационных системах. При этом существенную роль начинают играть вопросы защиты информации. Интерес к информационной безопасности проявляют не только государственные ведомства, но и коммерческие структуры. Электронная коммерция, продажа информации в режиме on-line и другие услуги становятся основными видами деятельности для ряда компаний, а их корпоративные информационные системы – главным инструментом управления бизнесом и фактически важнейшим средством производства.

Созданию хаотических систем для защиты информации способствовали успехи, достигнутые при разработке систем динамического хаоса, и появление хаотических отображений.

Под динамическим хаосом понимают сложные непериодические колебания, порождаемые нелинейными динамическими системами и полностью определяемые свойствами самой детерминированной динамической системы.

Использование динамического хаоса для хаотических систем защиты информации обусловлено способностью хаотических отображений обеспечивать скрытость передачи зашифрованной информации в блочных и поточных шифрах. Детерминизм хаоса способствует шифрованию информации, а его случайность делает систему стойкой к вскрытию [1]. Такие свойства, как спутанность и распыление, характерные для традиционных криптоалгоритмов, в хаотических реализуются с помощью соответствующих отображений и последующих итераций [2].

Целью работы является определение статистических свойств и визуализация зашифрованных на основе динамического хаоса выходных последовательностей алгоритма шифрования при использовании метода сингулярного спектрального анализа.

### Методика проведения исследований

В алгоритмах на основе динамического хаоса шифрование и расшифрование производится ключом, формируемым хаотическим отображением [3]. При шифровании каждый элемент открытого текста преобразуется с помощью хаотического отображения и последующих итераций. При расшифровании процесс идет в обратном порядке. В алгоритмах на основе динамического хаоса нами применяются дискретные отображения [4], которые определяются следующим образом. Пусть дано:  $S = \{0, 1, \dots, L-1\}$  – конечное множество мощности  $L$ , тогда отображение  $F$ , определенное на данном множестве  $(F: S \rightarrow S)$ , называется дискретным [5].

В качестве хаотических отображений могут быть использованы логистическое, тент-отображение, сдвиговое, пилообразное, отображения Чебышева второго и третьего порядка [1]. В данной работе нами использовано пилообразное отображение, которое представляет собой