

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЛУЧЁННЫХ ИОНАМИ ФОСФОРА С $E = 60$ КЭВ ПЛЁНКАХ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА

А. Н. Олешкевич¹, Н. М. Лапчук¹, Т. М. Лапчук¹, В. С. Волобуев²

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: oleshkevich@bsu.by*

²⁾ *Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а,
220006 Минск, Беларусь, e-mail: vlasname@belstu.by*

Исследование методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) релаксационных процессов в имплантированных ионами фосфора пленках полиэтилентерефталата (ПЭТФ) проводилось с целью изучения стабильности модифицированных ионной имплантацией поверхностных слоев образцов ПЭТФ при их длительном хранении. Было показано увеличение времени парамагнитной релаксации, что свидетельствует о структурировании и частичной кристаллизации имплантированных слоев пленок ПЭТФ за время их хранения в лабораторных условиях в течение одного года.

Ключевые слова: электронный парамагнитный резонанс; полиэтилентерефталат; имплантация; ионы фосфора.

RELAXATION PROCESSES IN POLYETHYLENE TEREPHTHALATE FILMS IRRADIATED WITH $E = 60$ KeV PHOSPHORUS IONS

A. N. Oleshkevich¹, T. M. Lapchuk¹, N. M. Lapchuk¹, V. S. Volobuyev²

¹⁾ *Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus*

²⁾ *Belarusian State Technological University, Sverdlova str. 13a, 220006 Minsk, Belarus
Corresponding author: A. N. Oleshkevich (oleshkevich @bsu.by)*

An EPR study of relaxation processes in PET films implanted with phosphorus ions was carried out in order to study the stability of the surface layers of PET samples modified by ion implantation during their long-term storage. An increase in the paramagnetic relaxation time was shown, which indicates structuring and partial crystallization of the implanted layers of PET films during their storage. under laboratory conditions for one year.

Key words: polyethylene terephthalate; electron paramagnetic resonance; ion implantation; phosphorus ions.

ВВЕДЕНИЕ

При применении модифицированных имплантацией ионов полимерных структур важно знать, насколько они стабильны в процессе хранения при обычных лабораторных условиях. После внедрения атомов примеси в полимер естественными будут процессы релаксации напряженных областей на границе раздела облученного слоя и исходной матрицы. Контролировать такие процессы на уровне нескомпенсированных спинов атомов в полимерных слоях возможно с помощью метода ЭПР, поскольку любые перестройки в системе созданных имплантаций ионов, например, проводящих структур, будут влиять на параметры спектров ЭПР.

Цель работы – исследовать влияние дозы имплантации и времени хранения в лабораторных условиях имплантированных пленок полиэтилентерефталата на времена спин-спиновой и спин-решеточной парамагнитной релаксации, свидетельствующих о стабильности основных параметров спектров ЭПР имплантированных полимерных пленок.

ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В исходной пленке, а также в пленке ПЭТФ, облученной ионами фосфора дозой 100 мкКл ($6 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $1 \text{ мкКл} = 6 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$) сигнал ЭПР не был обнаружен.

Начиная с дозы 200 мкКл ($1,2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$), в спектре ЭПР облученных пленок появляется одиночная линия, параметры которой меняются в зависимости от дозы облучения. Основные параметры линии ЭПР, которые свидетельствуют о структурных пере-

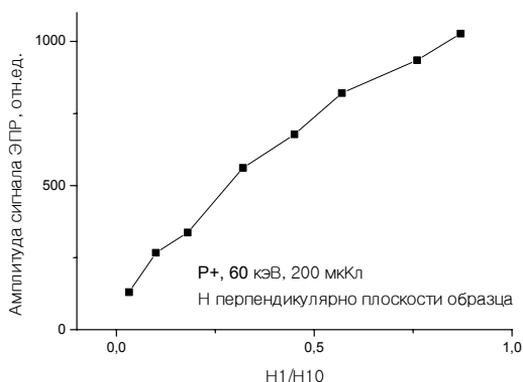


Рисунок 1. Зависимость амплитуды сигнала ЭПР пленки ПЭТФ, имплантированной ионами фосфора с энергией 60 кэВ и дозой 200 мкКл от мощности СВЧ излучения (поляризующее магнитное поле перпендикулярно плоскости образца ПЭТФ; H_1 – магнитная компонента СВЧ поля, H_{10} – соответствует максимальной мощности СВЧ излучения 200 мВт)

(спин-спиновой T_2 и спин-решеточной T_1) [2] нами изучалась кинетика насыщения спиновой системы имплантированной пленки ПЭТФ, т.е. влияние мощности излучения СВЧ на амплитуду сигнала ЭПР пленки (рис. 1).

Из приведенной зависимости можно рассчитать время спин-спиновой (T_2) и спин-решеточной (T_1) релаксации по следующим формулам:

$$T_1 = \frac{1,97 \cdot 10^{-7} \cdot \Delta H_{\max}}{g \cdot H_1^2}, \quad (1)$$

где H_1^2 – мощность в резонаторе, при которой наступает насыщение сигнала ЭПР.

В нашем случае зависимость слабо насыщающаяся, т.е. мы можем говорить, что насыщение начинает наступать при мощности порядка 200 мВт, т.е. при максимальной

ширина линии, фактор спектроскопического расщепления, изменение резонансной частоты. Изменение омических потерь в резонаторе при внесении в него исследуемых образцов полиэтилентерефталата контролировалось косвенно по изменению амплитуды эталонного образца рубина, наклеенного на стенку резонатора и резонансной частоты. Считается, что электропроводимость образца пропорциональна СВЧ потерям в резонаторе при помещении в него исследуемого образца [1].

Для расчета времен парамагнитной релаксации

мощности СВЧ излучения генератора (клистрона), используемого в нашей установке; ΔH_{\max} – ширина линий ЭПР при насыщении, т.е. когда амплитуда максимальна.

В нашем случае $\Delta H_{\max} = 4,59$ Гс, а g -фактор при этой мощности равен 2,00201, тогда $T_1 = 2,16 \cdot 10^{-6}$ с.

Расчет T_1 для пленки, измеренной приблизительно год назад, показал следующее значение: $T_1 = 1,84 \cdot 10^{-6}$ с, т.е. время спин-решеточной релаксации за период хранения имплантированной ионами фосфора с флюенсом 200 мкКл/см^2 пленки ПЭТФ в лабораторных условиях в течение года увеличилось в 1,17 раза.

Время спин-спиновой релаксации рассчитывалось по формуле:

$$T_2 = \frac{1,3131 \cdot 10^{-7}}{g \cdot \Delta H_{\min}}, \quad (2)$$

где ΔH_{\min} – ширина линии сигнала ЭПР в отсутствии насыщения.

В нашем случае отсутствует насыщение при 30 dB и при этой мощности параметры линии ЭПР следующие: $\Delta H_{\min} = 4,5$ Гс, а $g = 2,00201$, тогда $T_2 = 1,81 \cdot 10^{-8}$ с.

Расчет T_2 для пленки, измеренной приблизительно год назад, показал следующее значение: $T_2 = 1,7 \cdot 10^{-8}$ с, т.е. время спин-спиновой релаксации за период хранения имплантированной ионами фосфора с дозой 200 мкКл пленки ПЭТФ в лабораторных условиях в течение года увеличилось в 1,1 раза.

Приведенные ниже графики (рис. 2–3) отражают кинетику релаксационных процессов в пленках для трех выбранных доз облучения: 200, 1500 и 2000 мкКл.

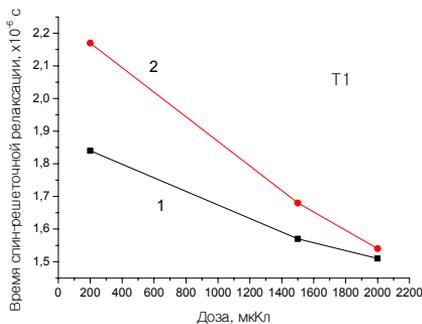


Рисунок 2. Зависимость времени спин-решеточной релаксации T_1 от дозы имплантации ионов фосфора в пленки ПЭТФ, рассчитанные в разные периоды регистрации спектров ЭПР: 1 – первые измерения после имплантации; 2 – повторные измерения тех же пленок через год. Пленки хранились в обычных лабораторных условиях при комнатной температуре в темноте

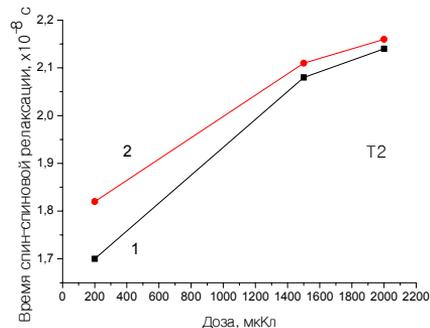


Рисунок 3. Зависимость времени спин-спиновой релаксации T_2 от дозы имплантации ионов фосфора в пленки ПЭТФ, рассчитанные в разные периоды регистрации спектров ЭПР: 1 – первые измерения после имплантации; 2 – повторные измерения тех же пленок через год. Пленки хранились в обычных лабораторных условиях при комнатной температуре в темноте

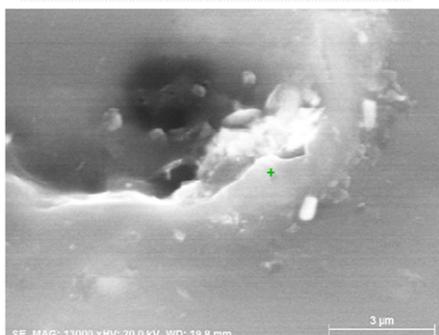


Рисунок 4. Поверхность пленки ПЭТФ, облученной ионами фосфора с энергией 60 кэВ и дозой 2000 мкКл

Увеличение времени спин-спиновой релаксации T_2 при максимальной дозе облучения ионами фосфора пленок ПЭТФ может свидетельствовать о частичной кристаллизации имплантированных слоев пленок ПЭТФ. Это хорошо видно из фрагмента микроскопического снимка образца ПЭТФ (рис. 4), имплантированного ионами фосфора с энергией 60 кэВ и дозой 2000 мкКл.

На поверхности пленки при проявлении эффекта блистеринга [3], четко видны кристаллы, имеющие форму параллелепипеда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование релаксационных процессов в имплантированных ионами фосфора пленках ПЭТФ свидетельствует о стабилизации модифицированных ионами фосфора слоев полимерных пленок. Максимально заметно процесс релаксации в пленках наблюдался для дозы 200 мкКл. Изменение времени парамагнитной релаксации, как видно, не очень существенно, но даже незначительное увеличение, например, спин-решеточной релаксации свидетельствует о структурировании и, возможно, частичной кристаллизации имплантированных слоев пленок ПЭТФ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Пул Ч. Техника ЭПР-спектроскопии: Пер. с англ. – Мир, 1970.
2. Лебедев Я.С., Муромцев В.И. ЭПР и релаксация стабилизированных радикалов. Изд. Химия, М.: 1973. – 256 с.
3. Primak W., Luthra J. Radiation blistering: Interferometric and microscopic observation of oxides, silicon, and metals. *Journal of Applied physics* 1966;37(6):2287–2294

ИМПЕДАНС БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР ПЕРЕХОДНОЙ МЕТАЛЛ/*n*-Si, ОБЛУЧЕННЫХ АЛЬФА-ЧАСТИЦАМИ

**Н. А. Поклонский¹, К. В. Усенко¹, А. И. Ковалев¹,
Н. И. Горбачук¹, С. Б. Ластовский²**

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: poklonski@bsu.by*

²⁾ *ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Беларусь, e-mail: lastov@ifftp.bas-net.by*

Методом импедансной спектроскопии исследованы диоды Шоттки 5КЭФ-0.9, 5.5КЭФ-1 (Mo/*n*-Si) и 8КЭФ-2.7 (Pd/*n*-Si) производства ОАО «Интеграл». Измерения индуктивности проводились на исходных диодах и диодах, облученных альфа-частицами с кинетической энергией $E_a \leq 5.147$ МэВ. На переменном токе в интервале частот от 20 Гц до 2 МГц определены значения максимумов индуктивности диодов