

**Выводы.** Разработанный показатель  $p_c$  (probability coincidence) совпадения теоретических и экспериментальных данных позволяет провести количественное оценивание адекватности теоретической математической модели данным эксперимента. Указанный показатель учитывает величину неопределенности измерения исследуемого показателя. Физическая суть –

вероятность совпадения теоретического и экспериментального распределения.

1. Лемешко Б. Ю. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход. Монография / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов, Е. В. Чимитова. – Новосибирск : Издво НГТУ, 2011. – 888 с.

УДК 541.183

## МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ИОНАМИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ С УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИЕЙ 1 МэВ/НУКЛОН

Бринкевич Д.И.<sup>1</sup>, Лукашевич М.Г.<sup>1</sup>, Просолович В.С.<sup>1</sup>, Харченко А.А.<sup>1</sup>, Янковский Ю.Н.<sup>1</sup>, Черный В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет

<sup>2</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Трековые мембраны (ТМ) – пористые полимерные пленки с микронными или нанопорами – предназначены для прецизионного фильтрования микро- и наночастиц, включая бактерии, кровяные тельца. Они нашли широкое применение в медицине, в процессах фильтрации воздуха и жидкостей, фармацевтических препаратов и биологических сред, а так же в качестве шаблонов для получения наноструктур [1,2]. Существенное преимущество ТМ как фильтров – одинаковый размер пор, который можно варьировать в широких пределах изменяя время травления, тип травителя и т.д.

Основным материалом ТМ является полиэтилентерефталат (ПЭТФ). Мембраны на основе ПЭТФ достаточно прочны и термостойки, что позволяет использовать их в бортовой аппаратуре рентгеновских телескопов в условиях открытого космоса на околоземной орбите [3]. Для изготовления ПЭТФ-мембран широко используется облучение ионами благородных газов с энергиями в несколько мегаэлектрон-вольт [2,3].

Целью настоящей работы являлось исследование влияния высокоэнергетичной имплантации инертных газов (Xe, Ar) на рельеф поверхности пленок полиэтилентерефталата.

Пленки ПЭТФ толщиной  $40 \pm 2$  мкм имплантировались ионами Ag и Xe с удельной энергией  $\sim 1$  МэВ/нуклон и дозами ( $\Phi$ ) от  $5 \cdot 10^8$  до  $1 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> при комнатной температуре на импульсном циклотроне ИЦ-9. Проецированный пробег ( $R_p$ ) ионов составлял  $\sim 20$  мкм. Плотность ионного тока варьировалась в интервале от 0,3 до 2,5 мкА/см<sup>2</sup>. Морфология поверхности полимерной плёнки исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) при комнатной температуре в полуконтактном резонансном режиме на частоте 145 кГц на установке Solver P-47. Использовались кантилеверы серии NSG 01 с радиусом закругления 10 нм. Одновременно измерялась

среднеарифметическая шероховатость ( $R_a$ ) поверхности.

На рис.1 приведены типичные АСМ 3D изображения поверхностей пленок ПЭТФ, имплантированных ионами инертных газов с удельной энергией 1 МэВ/нуклон. АСМ-изображения как имплантированной, так и не-

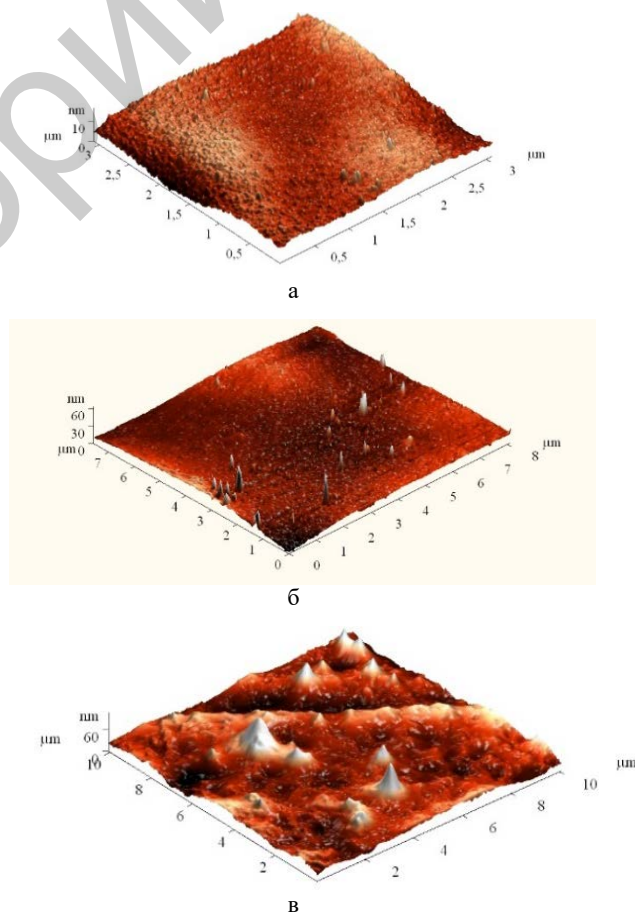


Рисунок 1 – АСМ 3D изображения поверхностей пленок ПЭТФ, имплантированных ионами Xe (а) и Ar (б, в) с удельной энергией 1 МэВ/нуклон

Доза, см<sup>2</sup>: а -  $5 \cdot 10^8$ ; б -  $5 \cdot 10^{15}$ ; в -  $1 \cdot 10^{17}$  имплантированной (обратной) поверхностей ПЭТФ пленки существенно не отличались. На них наблюдались хаотично расположенные конусообразные «вспучености» высотой до 70 нм и диаметром в основании до 100-200 нм (рис.1). С увеличением дозы размеры «вспученостей» - высота и диаметр в основании увеличиваются, а концентрация их на единицу поверхности снижается (сравни рис.1а,в). Так если при  $\Phi = 5 \cdot 10^8$  см<sup>-2</sup> плотность «вспученостей» составляла  $\sim 10$  мкм<sup>-2</sup>, высота менее 10 нм, а диаметр в основании  $\sim 50$  нм (рис.1а), то при  $\Phi = 1 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> плотность снижалась до  $(5-10) \cdot 10^{-2}$  мкм<sup>-2</sup> при среднем диаметре в основании около 400 нм (рис.1в).

На имплантированной поверхности помимо «вспученостей» наблюдалось формирование волнистой поверхности с периодом  $\sim 1$  мкм и высотой около 20–30 нм (рис.1в). Формирование «волн» при имплантации может быть связано с частичной ориентацией и кристаллизацией полимерной пленки в процессе изготовления. С другой стороны, при облучении имеет место высокая локальная неоднородность процессов радиационно-индуцированной деструкции и сшивания полимеров [4]. Радиационные эффекты наиболее интенсивно проявляются в аморфных областях, что при облучении частично ориентированных полимеров приводит к формированию «волн» на поверхности.

Конусообразные «вспучености» наблюдаются не только при ионной имплантации, но и при других видах высокоэнергетического воздействия, например, при  $\gamma$ -облучении полимеров [5]. Кроме того, они могут формироваться за пределами области высокоэнергетического воздействия. Так, в работе [6] при облучении пленок ПЭТФ толщиной 3,8 мкм вакуумно-ультрафиолетовым излучением в спектральном диапазоне 115–135 нм наблюдалось формирование подобных конусообразных структур на обратной (не облучаемой) стороне пленки. Вероятнее всего, их формирование обусловлено релаксацией полей упругих напряжений при внешнем высокоэнергетическом воздействии [5]. Косвенным подтверждением этого предположения может служить скопление «вспученостей» вблизи дефектов поверхности.

Радиационная модификация поверхности наблюдалась также на обратной (неимплантированной) стороне пленки. Полученные экспериментальные результаты могут быть объяснены с учетом следующих обстоятельств. В полимерах возможны различные механизмы передачи энергии: в виде упругих волн (колебаний атомов) или

посредством передачи энергии возбуждения молекул по электронной подсистеме. При этом наличие длинных цепей и периодичность структуры полимеров способствует передаче энергии из области проецированного пробега ионов на сравнительно большие расстояния.

Прямое воздействие ионов на полимер, а также нейтрализация разноименно заряженных ионов и рекомбинация свободных радикалов в треке иона приводят к образованию молекул в возбужденном состоянии. Перенос энергии возбуждения возможен на значительные расстояния вглубь полимера. Оценки показывают, что средний «пробег» электронного возбуждения по алифатической цепочке составляет более 100 связей С–С [4]. Однако, данные расстояния существенно меньше, чем толщина исследованных пленок (40-50 мкм). Поэтому корректно объяснить радиационно-стимулированные процессы на обратной стороне пленки передачей энергии возбуждения электронной подсистемы молекул не представляется возможным. Вероятнее всего, энергия из области пробега ионов на обратную сторону пленки передается с помощью упругих волн, которые могут распространяться по цепочке молекулы либо по границам раздела фаз.

1. Волков В.В., Мчедlishвили Б.М., Ролдугин В.И., Иванчев С.С., Ярославцев А.Б. Мембраны и нанотехнологии // Росс. нано-технологии. – 2008. – Т.3, № 11–12. – С.67–99.
2. Кириш Ю.Э., Тимашев С.Ф. Полимерные мембраны как химические гетерогенные каналы наноструктуры // Крит. техно-логии. Мембраны – 1999 – № 1 – С.15–46.
3. Митрофанов А.В., Апель П.Ю., Блонская И.В., Орелович О.Л. Дифракционные фильтры на основе полиимидных и поли-этиленнафталатных трековых мембран // Журнал технической физики. – 2006. – Т.76, № 9. – С.121–127.
4. Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров. – М.: Мир, 1988. – 246 с.
5. Харченко А.А., Бринкевич Д.И., Бринкевич С.Д., Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В., Лукашевич М.Г., Просолович В.С., Оджаяев В.Б. Исследование поверхности полимеров модифицированной радиационной обработкой // Вестник ПГУ. Серия С. Фундаментальные науки. – 2013. – № 12. – С.83–90.
6. Митрофанов А.В., Карбань О.В., Сугоняко А., Любомска М. Исследование поверхности пленок из полиэтилентерефталата, модифицированных вакуумно-ультрафиолетовым облучением на воздухе // Поверхность. – 2009. – № 7. – С.30–38.