ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ИОННО-ИНДУЦИРОВАННОГО МИКРОРЕЛЬЕФА НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИДИМЕТИЛСИЛОКСАНА

О.М. Марченко[1), 3)], А.П. Яковлев[3)], Д.К. Миннебаев[1), 2)], Д.С. Киреев[1), 2)], А.А. Шемухин[1)], А.П. Евсеев[1)], А.С. Ерофеев[3)], А.Д. Шпорин[1), 2)]
[1)]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Ленинские горы 1, Москва 119991, Россия, oleg.marchenko.99@bk.ru minnebaev.dk17@physics.msu, dmtr.kireeff6497@yandex.ru, shemuhin@gmail.com, ap.evseev@physics.msu.ru, shporin.ad16@physics.msu.ru*
[2)]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, Москва 119991, Россия,*
[3)]*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский пр. 4, Москва 119049, Россия, iakovlev.ap@misis.ru, Erofeev.AS@misis.ru*

Объектом исследования являлись образцы полидиметилсилоксана. В работе проводились эксперименты по модифицированию поверхности ПДМС пучками атомарных и кластерных ионов аргона с энергиями до 10 кэВ. Угол падения ионного пучка составлял 60˚ и 0˚, флюенс облучения составлял от 10^{15} до 10^{16} ион/см^2. В результате облучения на поверхности образовывался микрорельеф, характерные размеры, интенсивность и упорядоченность которого зависели от параметров ионного пучка. Топография поверхности исследовалась методами атомно-силовой и оптической микроскопии. Описаны основные процессы, предположительно влияющие на формирование микрорельефа, Представлены данные о параметрах возникающего микрорельефа, сделаны выводы о соответствии полученных данных описанной модели взаимодействия низкоэнергетичного ионного пучка с полимерной мишенью.

Ключевые слова: модификация поверхности ионно-пучковыми методами; пучки кластерных ионов; атомно-силовая микроскопия; полимеры.

FEATURES OF THE FORMATION OF ION-INDUCED MICRORELIEF ON THE SURFACE OF POLYDIMETHYLSILOXANE

O.M. Marchenko[1), 3)], A.P. Yakovlev[3)], D.K. Minnebaev[1), 2)], D.S. Kireev[1), 2)], A.A. Shemukhin[1)], A.P. Evseev[1)], A.S. Erofeev[3)], A.D. Shporin[1), 2)]
[1)]*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, oleg.marchenko.99@bk.ru, minnebaev.dk17@physics.msu, dmtr.kireeff6497@yandex.ru, shemuhin@gmail.com, ap.evseev@physics.msu.ru, shporin.ad16@physics.msu.ru*
[2)]*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
[3)]*NUST MISIS, Moscow, Russia, iakovlev.ap@misis.ru, Erofeev.AS@misis.ru*

The object of the study were samples of polydimethylsiloxane. The samples were tablets with a diameter of up to 8 mm and a height of up to 3 mm. Experiments were carried out to modify the PDMS surface with beams of atomic and cluster argon ions with energies up to 10 keV. The angle of incidence of the ion beam was 60 and 0, the irradiation fluence ranged from 1015 to 1016 ions/cm2. As a result, an ion-induced microrelief was formed on the surface, the characteristic dimensions, intensity and ordering of which depended on the parameters of the ion beam. Such a microrelief can have a great influence on the surface properties of the material, such as hydrophilicity, hydrophobicity, biocompatibility, etc. The microrelief was studied by atomic force and optical microscopy. The main processes presumably influencing the formation of the microrelief are described, data on the parameters of the emerging microrelief are presented, conclusions are drawn about the correspondence of the data obtained to the described model of interaction of a low-energy ion beam with a polymer target.

Keywords: ion beams; cluster ion beams; atomic force microscopy; polymers.

Введение

Существует большое количество способов модифицирования поверхности, в их числе механические методы (шлифовка), травление (химическое или плазменное), осаждение из раствора и др. Ионно-пучковая обработка поверхности образца выделяется среди всех других методов, т.к. позволяет реализовывать широкий спектр изменений в образце, варьируя большое число параметров: тип ионов, их энергию, флюенс, ток пучка и угол падения на поверхность. Таким образом, облучение полимеров ускоренными ионами может использоваться для изменения их свойств, что находит применение, например, при производстве электроники и медицинских материалов.

Полидиметилсилоксан – это силиконовый полимер, который широко используется в различных отраслях, включая медицину, электронику, косметику и технику. ПДМС часто используется для изготовления микрофлюидных устройств, микрочипов и других электронных компонентов. Основные свойства ПДМС включают в себя [1]:

- Термостабильность: ПДМС обладает очень высокой термостабильностью и может выдерживать температуры до 300 градусов Цельсия.
- Биосовместимость: ПДМС является биосовместимым материалом и может использоваться в медицине для создания имплантатов.
- Инертность: ПДМС является инертным материалом и не реагирует с большинством химических веществ.
- Устойчивость к радиации: ПДМС обладает высокой устойчивостью к радиации и может использоваться в космических приложениях.

ПДМС относится к классу сшивающихся полимеров [2] и в этой связи процессы сшивания, сопровождающиеся отверждением и охрупчиванием приповерхностных слоёв, протекают в нем при обработке ионным пучком весьма интенсивно. Механизм протекания таких процессов подробно рассмотрен в [3, 4].

Из-за сшивания и силикатизации обработанного полимера в поверхностном слое возникают напряжения. Напряжения достаточно сильны, чтобы вызвать деформацию толстого поверхностного слоя толщиной в микроны и десятки микрон. Эти деформации приводят к причудливой морфологии поверхности полимерных материалов после обработки ионным пучком.

Методика эксперимента

Исходные образцы представляли собой гладкие пластины из полидиметилсилоксана Dow Corning Sylgard 184. В ходе выполнения работы производилось облучение исходных гладких образцов из ПДМС пучками атомарных и кластерных ионов аргона с энергиями до 10 кэВ. Облучения проводились на низкоэнергетическом имплантере и ускорителе газовых кластерных ионов, входящих в состав ЦКП «Ускорительный комплекс МГУ». В процессе облучения варьировался флюенс облучения и угол падения пучка на плоскость образца.

Для контроля топографии поверхности применялся метод полуконтактной атомно-силовой микроскопии. Измерения проводились на эталонном образце, для определения начального рельефа поверхности до ионно-пучковой обработки, и для каждого из облученных образцов. Кроме того, для контроля изменений применялась оптическая микроскопия.

Результаты и их обсуждение

Для образца, облученного атомарными ионами аргона с энергией 8 кэВ под углом падения пучка 60°, с флюенсом 10^{15} ион/см^2 АСМ изображение характерного вида рельефа приведено на рисунке 1 (а). Наблюдалось образование доменной структуры «вспучивания», рельеф имел выраженную пространственную направленность, что свидетельствует о зависимости направления образовавшихся «волн» от направления ионного пучка.

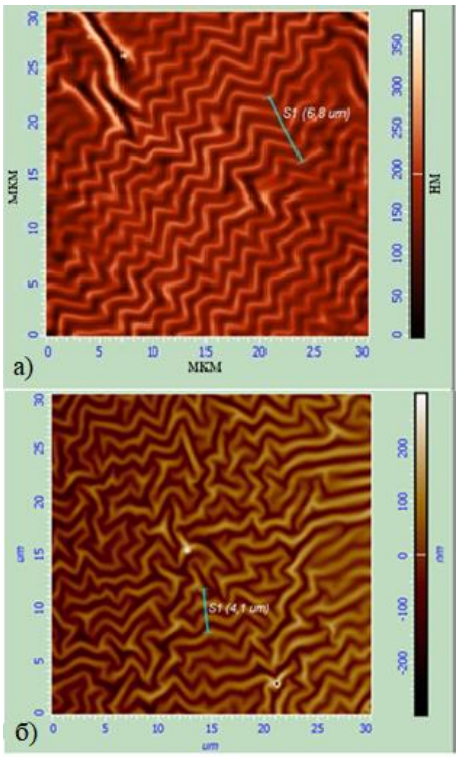

Рис. 1. АСМ изображение поверхности облученных образцов

Для образца, облученного атомарными ионами аргона с энергией 8 кэВ под углом падения пучка 60˚, с флюенсом $5{\cdot}10^{15}$ ион/см^2 АСМ изображение характерного вида рельефа приведено на рисунке 1 (б). Характер рельефа довольно заметно изменился с увеличением флюенса. Интенсивность же рельефа изменилась мало.

Для образца, облучение которого проводилось кластерными ионами аргона энергией 8 кэВ, флюенс облучения 10^{15} ион/см^2. АСМ исследование не показало существования на образце характерного рельефа. При исследовании в оптическом микроскопе было выявлено образование на поверхности образца характерных температурных трещин, оптическая микрофотография образца приведена на рис. 2.

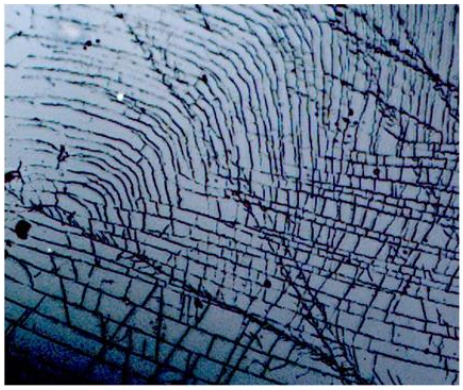

Рис. 2. Оптическое изображение трещин на поверхности облученных образцов

Заключение

Образование микрорельефа при ионно-пучковой обработке ПДМС связано с процессами сшивания и силикатизации. При увеличении коэффициента распыления эти процессы играют меньшую роль, в связи с чем микрорельеф не образуется

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-1353.

Библиографические ссылки

1. Ubong Eduok, Omar Faye, Jerzy Szpunar. Recent developments and applications of protective silicone coatings: A review of PDMS functional materials. *Progress in Organic Coatings* 2017; 111: 124-163.
2. Moon M.W., Lee S.H., Sun J.Y. Wrinkled hard skins on polymers created by focused ion beam. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2007; 104(4): 1130-3.
3. Kondyurin, M. Bilek (Eds.) Ion Beam Treatment of Polymers (Second Edition), Elsevier, Oxford. 2015.
4. Оджаев В.Б., Козлов И.П., Попок В.Н. и др. Ионная имплантация полимеров. Минск: Белгосуниверсит, 1998: 197 с.