

УДК 539.534.9

К.П. САВКИН*, А.С. БУГАЕВ*, А.В. ВИЗИРЬ*, А.Г. НИКОЛАЕВ*, Е.М. ОКС***, И.В. ПУХОВА*,
М.В. ШАНДРИКОВ*, Г.Ю. ЮШКОВ*, А.В. ТЮНЬКОВ**, И.А. КУРЗИНА***

ИСТОЧНИК ИОНОВ НА ОСНОВЕ ВАКУУМНОГО ДУГОВОГО И ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДОВ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ¹

Представляются результаты исследования источника, генерирующего пучки ионов газов и металлов, для модификации поверхностных свойств органических полимеров. В качестве основы данного устройства применялся вакуумно-дуговой источник ионов металлов Mevva-5.Ru. Для получения пучков ионов аргона был реализован режим функционирования разрядной системы ионного источника в режиме тлеющего разряда с полым катодом. Для этого потребовались минимальные изменения в схеме электропитания и внутренней конструкции разрядной камеры. Источник функционировал в импульсном режиме со скважностью порядка 10^4 . Плотность тока ионного пучка составляла $10\text{--}50$ мкА/см², а средняя энергия ионов была 20 кэВ. Такие параметры обеспечивали эффективное взаимодействие ионов аргона с мишенями на основе поливинилового спирта (ПВС) и политетрафторэтилена (ПТФЭ), при экспозиционных дозах $10^{14}\text{--}10^{16}$ ион/см². Структура поверхности экспериментальных образцов была исследована методом атомно-силовой микроскопии. Продемонстрировано, что имплантация ионов серебра приводит к увеличению неоднородности микрорельефа поверхности ПВС по высоте, а имплантация ионов аргона – к увеличению коэффициента трения поверхности ПТФЭ.

Ключевые слова: вакуумный дуговой разряд, полый катод, ионная имплантация.

Введение

Коллективом авторов на протяжении последнего десятилетия для исследований, направленных на модификацию поверхностных свойств биосовместимого полиэтилена высокой плотности, биоразлагаемых полимеров на основе полилактида, а также текстильных материалов, состоящих из синтетических и натуральных волокон, активно применялся источник ионов металлов на основе вакуумного дугового разряда Mevva-5.Ru [1]. Была показана эффективность имплантации ионов металлов, применительно к увеличению таких характеристик, как огнеупорность, гидрофобность, стойкость к истиранию, антибактериальные свойства поверхности [2]. Тем не менее достижение положительных результатов является компромиссом между ожидаемым эффектом и последствиями воздействия пучков ускоренных ионов металлов, связанными с радиационной и термической деструкцией полимерной мишени. Было показано, что при средней энергии ионов в пучке более 20 кэВ, независимо от материала ионов и значения экспозиционной дозы, поверхностные свойства, в основном, определялись наличием несвязанных атомов углерода, которые образуются в треках торможения ионов, в результате разрушения молекул полимеров. В связи с этим экспериментальным фактом целесообразно рассматривать в качестве инструмента для модификации поверхностных свойств полимерных материалов пучки ускоренных ионов инертных газов, извлекаемых из плазмы газового разряда.

В исследованиях, связанных с применением источника Mevva-5.Ru, были реализованы режимы, при которых осуществлялась генерация ионов газов. Создание магнитного поля с индукцией на уровне 0.1 Тл в области катода вакуумного дугового разряда, при напуске газа в разрядную систему, позволяло осуществлять генерацию комбинированных пучков, состоящих из ионов металлов и газов [3]. Применение композитного катода, основной материал которого насыщен молекулами газа, также позволяет генерировать комбинированные ионные пучки в обычном режиме функционирования вакуумного дугового разряда. При этом генерация ионов газа преимущественно происходит в плазме катодных пятен [4]. Изменение полярности источников питания иницирующего и основного разрядов открывало возможность перехода к режиму функционирования в режиме тлеющего разряда с полым катодом [5]. Тем не менее для ряда технологических применений присутствие ионов металлов в пучке заряженных частиц может быть недопустимым. Поэтому возможность перехода к режиму генерации ионов газов, при сохранении возможности, при необ-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках проектов № 13-08-98121-р_сибирь_а и 15-08-05496-а.

ходимости, получения ионов металлов, с использованием одного устройства является весьма привлекательной.

Устройство и принцип функционирования ионного источника

В разрядной системе ионного источника Mevva-5.Ru (рис. 1, а), образованной полым анодом протяженностью 13 см и диаметром 10 см и катодным узлом, при изменении полярности источника питания, а также при напуске газа реализуются условия для функционирования самостоятельного тлеющего разряда, когда анод вакуумного дугового разряда становится полым катодом и соответственно катодный узел является анодом.

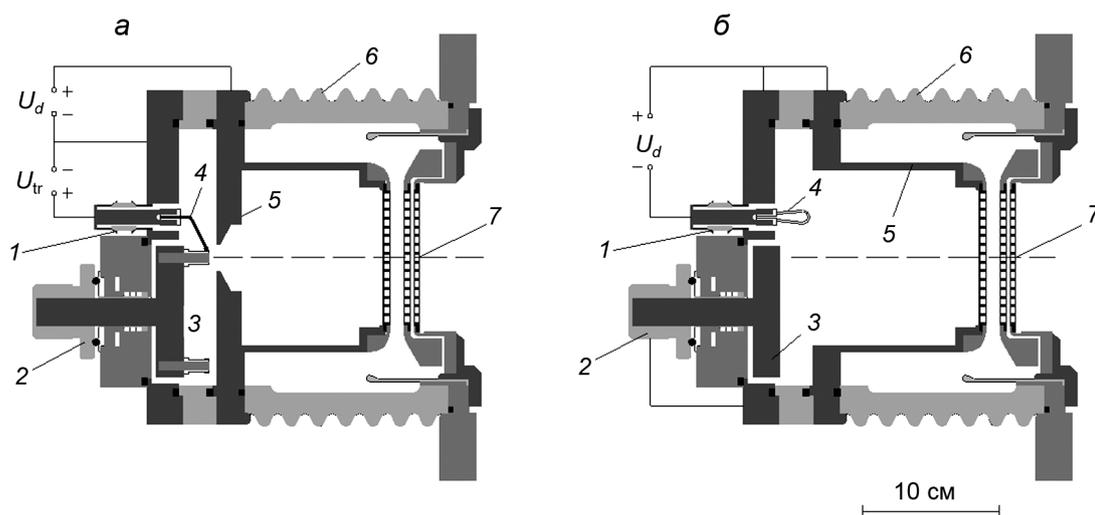


Рис. 1. Схема электродов источника ионов: 1 – изолятор; 2 – манипулятор держателя катодов; 3 – держатель катодов; 4 – электрод инициирующего разряда; 5 – анод вакуумного дугового разряда; 6 – высоковольтный изолятор; 7 – ионно-оптическая система (а); 1 – изолятор; 2, 3, 5 – полый катод; 4 – анод тлеющего разряда; 6 – высоковольтный изолятор; 7 – ионно-оптическая система (б)

Для обеспечения условий стабильного зажигания газового разряда без применения вспомогательного инициирующего разряда на основе пробоя по поверхности диэлектрика, сопровождающегося появлением катодных пятен, были внесены небольшие изменения в конструкцию разрядной системы (рис. 1, б) и преобразована импульсная схема питания разряда. С электрода, выполняющего функцию полого катода, был демонтирован фланец (рис. 1, а, 5). Катодный узел вакуумного дугового разряда (рис. 1, б, 3) электрически соединялся с полым катодом. К держателю электрода инициирующего разряда, смонтированного на проходном изоляторе (рис. 1, б, 1), крепился анод тлеющего разряда (рис. 1, б, 4). Для обеспечения минимального напряжения зажигания и функционирования разряда выполнялось условие соотношения площадей полого катода к площади анода $S_k/S_a \geq \sqrt{(M_i/m_e)}$. Применительно к генерации ионов аргона данное соотношение должно составлять на уровне ≥ 270 , размеры электродов данной разрядной камеры определяют его на уровне 300. В качестве источника питания тлеющего разряда с полым катодом использовался высоковольтный импульсный источник питания разряда по поверхности диэлектрика, инициирующего вакуумный дуговой разряд в источнике Mevva-5.Ru. В настоящей работе к выходу высоковольтного импульсного трансформатора через выпрямительный диод параллельно подключался накопительный конденсатор $C = 0.25$ мкФ, который разряжался через балластное сопротивление $R = 1.5$ кОм, ограничивающее ток разряда.

Откачка осуществлялась высоковакуумным криосорбционным насосом. Напуск рабочего газа аргона производился непосредственно в разрядную камеру ионного источника. Трёхсеточная ионно-оптическая система, состоящая из многоапертурных электродов диаметром 10 см, обеспечивала перепад давления между ионным источником и вакуумной камерой два порядка по величине. Устойчивое инициирование тлеющего разряда с полым катодом происходило при давлении аргона в ионном источнике не менее $3 \cdot 10^{-2}$ Торр. Повышение давления более $8 \cdot 10^{-2}$ Торр в ионном источнике приводило к возникновению пробоев в ионно-оптической системе, поэтому исследования

производились при давлении аргона в ионном источнике $5 \cdot 10^{-2}$ Торр, что соответствовало давлению в области вакуумной камеры $5 \cdot 10^{-4}$ Торр.

На рис. 2 представлены типичные осциллограммы импульсов токов разряда и ионного пучка, измеренного с помощью магнитно-изолированного цилиндра Фарадея, расположенного на расстоянии 60 см от системы извлечения источника, при ускоряющем напряжении 20 кВ. Амплитуда импульса тока разряда (рис. 2, а) регулировалась в диапазоне от 200 мА до 1 А, при длительности экспоненциально затухающего импульса около 1.5 мс. Осциллограмма ионного тока (рис. 2, б) получена при ускоряющем напряжении 20 кВ. Форма импульса имела такой же вид, а временная задержка относительно фронта импульса тока разряда около 2 мкс соответствовала времени пролёта ионов. На рис. 3 представлена зависимость распределения плотности ионного тока по сечению пучка на расстоянии около 60 см от ионно-оптической системы. Неоднородность распределения на площадке диаметром 5 см с центром, совпадающим с осью пучка, в пределах которой располагались образцы в процессе имплантации, составляла не более $\pm 5\%$ от максимального значения плотности ионного тока.

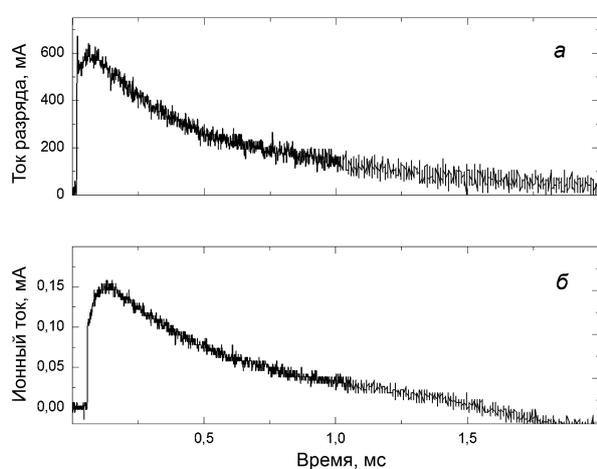


Рис. 2. Осциллограммы импульсов: а – тока тлеющего разряда с полым катодом; б – тока ионов аргона

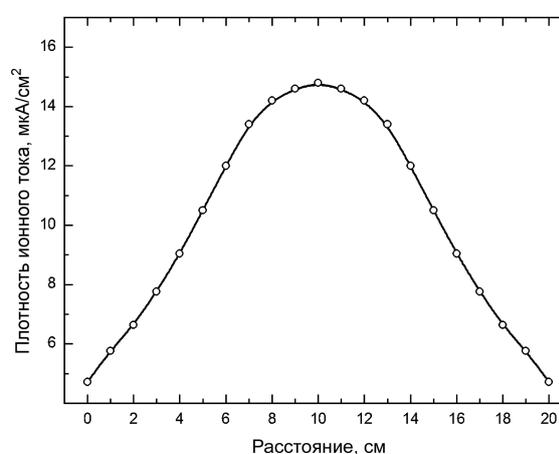


Рис. 3. Профиль распределения плотности тока ионов аргона по сечению пучка

Ионная имплантация полимерных материалов

Экспериментальные образцы поливинилового спирта и политетрафторэтилена подвергались воздействию пучков ионов серебра, при функционировании ионного источника в режиме вакуумного дугового разряда, и аргона в режиме тлеющего разряда с полым катодом. Ускоряющее напряжение во всех экспериментах составляло 20 кВ. С учётом средней зарядности ионов серебра в плазме вакуумного дугового разряда, равной $\langle Q \rangle_{\text{Ag}} = 2$, средняя энергия ионов серебра в пучке составляла 40 кэВ.

При генерации ионов аргона давление в области транспортировки ионного пучка составляло $5 \cdot 10^{-4}$ Торр, при котором в потоке заряженных частиц преобладают однозарядные ионы аргона. Следовательно, средняя энергия ионов аргона в пучке составляла 20 кэВ. Скорость набора экспозиционной дозы и средняя плотность мощности регулировались током ионного пучка и частотой следования импульсов и составляли для ионов аргона и для ионов серебра $1 \cdot 10^{11}$ ион/(см²·с) и 0.5 мВт/см² соответственно. В процессе обработки ионными пучками образцы фиксировались на поверхности водоохлаждаемого коллектора, их температура не превышала 20° С. На рис. 4 представлены результаты анализа поперечных «срезов» изображений, полученных методом атомно-силовой микроскопии. Они демонстрируют увеличение неоднородностей микрорельефа поверхности по мере увеличения экспозиционной дозы более чем в 2 раза относительно первоначального уровня. На рис. 5 представлены зависимости коэффициента трения поверхности образцов из политетрафторэтилена, имплантированных ионами серебра и аргона с экспозиционными дозами $1 \cdot 10^{16}$ ион/см². По сравнению с необработанным образцом, при одинаковой нагрузке, в начальный момент времени коэффициент трения имплантированных образцов увеличивался почти в 2 раза.

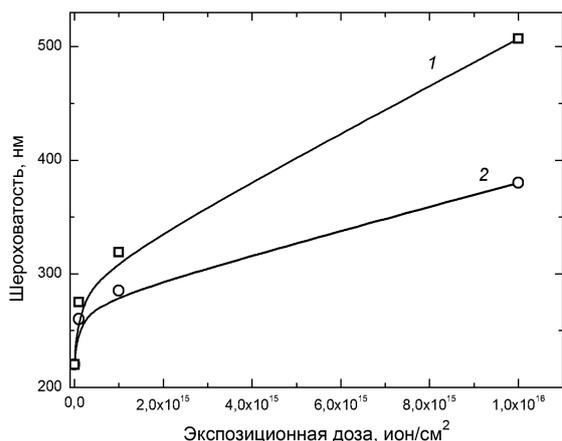


Рис. 4. Зависимости шероховатости поверхности ПВХ от экспозиционной дозы ионов: кр. 1 – серебра; кр. 2 – аргона

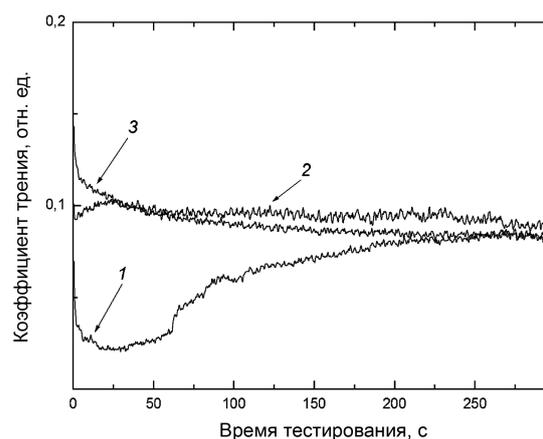


Рис. 5. Зависимости коэффициента трения поверхности ПТФЭ от времени воздействия: кр. 1 – необработанный образец; кр. 2 – имплантационный ионами аргона; кр. 3 – серебра

Заключение

Представленные результаты свидетельствуют об эффективном взаимодействии пучков ускоренных ионов с поверхностями полимерных материалов. На данном этапе исследований было показано, что имплантация ионов серебра и аргона с экспозиционной дозой на уровне $1 \cdot 10^{16}$ ион/см² приводит к увеличению неоднородности микрорельефа обрабатываемой поверхности. Как следствие, это явление сопровождается увеличением коэффициента трения поверхности. Практическая ценность полученных результатов заключается в демонстрации возможности модификации поверхностных свойств биосовместимых полимеров с низкой температурной стойкостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nikolaev A.G., Savkin K.P., Yushkov G.Yu., et al. // 10th International Conference on Modification of Materials with Particle beams and Plasma Flows. – 2010. – P. 401–404.
2. Urkac E.S., Oztarhan A., Tihminlioglu F., Kaya N. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2007. – V. 261. – P. 699–703.
3. Oks E.M., Yushkov G.Yu., Evans P.J., Oztarhan A., Brown I.G. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 1997. – V. 127. – P. 782–786.
4. Баренгольц С.А., Карнаухов Д.Ю., Николаев А.Г., Савкин К.П., Окс Е.М. // ЖТФ. – 2015. – Т. 85. – Вып. 7. – С. 45–54.
5. Yushkov G.Yu., MacGill R.A., and Brown I.G. // Review of Scientific Instruments. – 1989. – V. 75 (5). – P. 1582–1584.

*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 03.08.15.

**Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

***Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: savkin@opee.hcei.tsc.ru

Савкин Константин Петрович, к.т.н., науч. сотр. лаб. плазменных источников;
 Бугаев Алексей Сергеевич, к.ф.-м.н., науч. сотр. лаб. плазменных источников;
 Визирь Алексей Владимович, д.т.н., ст. науч. сотр. лаб. плазменных источников;
 Николаев Алексей Геннадьевич, к.т.н., ст. науч. сотр. лаб. плазменных источников;
 Окс Ефим Михайлович, д.т.н., зав. лаб. плазменных источников;
 Пухова Ирина Владимировна, аспирантка лаб. плазменных источников;
 Шандриков Максим Валентинович, к.т.н., науч. сотр. лаб. плазменных источников;
 Юшков Георгий Юрьевич, д.т.н., ведущ. науч. сотр. лаб. плазменных источников;
 Тюньков Андрей Владимирович, к.т.н., ст. науч. сотр. лаб. плазменной электроники;
 Курзина Ирина Александровна, д.ф.-м.н., зав. лаб. каталитических исследований.

K.P. SAVKIN*, A.S. BUGAEV*, A.V. VIZIR*, A.G. NIKOLAEV*, E.M. OKS**, I.V. PUHOVA*,
M.V. SHANDRIKOV*, G.Yu. YUSHKOV*, A.V. TYUNKOV*, I.A. KURZINA***

ION SOURCE BASED ON VACUUM ARC AND GLOW DISCHARGES FOR POLYMERIC MATERIALS SURFACE MODIFICATION

Ion source which generates beams of gas ions for modification of organic polymers surfaces by ion implantation is presented. Originally this device is conventional ion source Mevva-5.Ru based on a vacuum arc discharge. For treatment of polymers such as polyethylene, polyvinyl alcohol and polytetrafluoroethylene is required to generate of argon ions. For generation of argon ion beam we made minimal internal changes in construction of ion source discharge chamber and in external electrical circuit. Thus we realized operating of discharge system in a hollow cathode glow discharge mode. Discharge were operated in pulse mode with duty cycle lower 10^{-4} . The current density of ion beam was $10\text{--}50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, mean energy of ions was 20 keV. Implantation was performed with fluence $10^{14}\text{--}10^{16}$ ion/cm². Structure of polymer species surfaces after ion implantation were analyzed by atomic force microscopy. It was shown that the implantation of silver ions elevates the nonuniformity of polyvinyl alcohol surface and argon ions implantation elevates the friction coefficient of polytetrafluoroethylene surface.

Keywords: vacuum arc, glow discharge with hollow anode, ion implantation.

REFERENCES

1. Nikolaev A.G., Savkin K.P., Yushkov G.Yu., Oks E.M., Oztarhan A., Akpet A., Kocabas E.H., Urkac E.S., and Cireli I. Modification Of The Textile Materials By Vacuum Arc Ion Source Implantation. *Proceeding on 10th International Conference on Modification of Materials with Particle beams and Plasma Flows*, 2010, pp. 401–404.
2. Urkac E.S., Oztarhan A., Tihminlioglu F., Kaya N., Ila D., Muntele C., Budak S., Oks E., Nikolaev A., Ezdesir A., Tek Z. (2007). Thermal characterization of Ag and Ag + N ion implanted ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 261, 699–703.
3. Oks E.M., Yushkov G.Yu., Evans P.J., Oztarhan A., Brown I.G., Dickinson M.R., Liu F., MacGill R.A., Monteiro O.R., and Z. Wang. (1997). Hybrid gas-metal co-implantation with a modified vacuum arc ion source. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 127/128, 782–786.
4. Barengolts S.A., Karnaukhov D.Yu., Nikolaev A.G., Savkin K.P., Oks E.M., Uimanov I.V., Frolova V.P., Shmelev D.L., and Yushkov G.Yu. (2015). Generation of Hydrogen Isotope Ions in a Vacuum Arc Discharge with a Composite Zirconium Deuteride Cathode. *Technical Physics*, 60(7), 989–999.
5. Yushkov G.Yu., MacGill R.A., and Brown I.G. (2004). Mevva ion source operated in purely gaseous mode. *Review of Scientific Instruments*, 75(5), 1582–1584.