

УДК 621.365

Шрам Олександр Анатолійович, канд. техн. наук, доцент кафедри «Електропостачання промислових підприємств»

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна, вул. Жуковського 64, 69063.
Тел. +38-067-613-69-41. E-mail: alexshrum@yahoo.com (<http://orcid.org/0000-0003-4206-7716>)

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛАЗМОВОГО ПОТОКУ УСТАНОВКИ ДЛЯ ІОННО-ПЛАЗМОВОЇ МОДИФІКАЦІЇ СКЛА

У статті на підставі зондової методики досліджено зміну потенціалу плазмового потоку й проведена оцінка концентрації позитивних іонів матеріалу впровадження при іонно-плазмовій модифікації поверхні скла при атмосферному тиску.

Ключові слова: іон, низькотемпературна плазма, електричний зонд, вольт-амперна характеристика, скло.

Шрам Александр Анатольевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина, ул. Жуковского 64, 69063.
Тел. +38-067-613-69-41. E-mail: alexshrum@yahoo.com (<http://orcid.org/0000-0003-4206-7716>)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ СТЕКЛА

В статье на основании зондовой методики исследовано изменение потенциала плазменного потока и оценена концентрация положительных ионов материала внедрения при ионно-плазменной модификации поверхности стекла при атмосферном давлении.

Ключевые слова: ион, низкотемпературная плазма, электрический зонд, вольт-амперная характеристика, стекло.

Shram Alexander, Cand. Sc. (Tech.), Senior Lecturer of “Power supply of industrial enterprises”
Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine, Zhukovskogo str., 64, 69063.
Tel. +38-067-613-69-41. E-mail: alexshrum@yahoo.com (<http://orcid.org/0000-0003-4206-7716>)

THE STUDY OF PLASMA FLOW' PARAMETERS OF THE ELECTROTECHNICAL COMPLEX FOR ION-PLASMA SURFACE MODIFICATION OF GLASS

Change of the glass's surface properties using plasma treatment is a progressive technological method that allows achieves the surface layer with desired physical properties. To choose technological parameters ion-plasma treatment of the surface of the glass at atmospheric pressure, is necessary to examine potential variation of the plasma flow rate and the concentration of positive ions of the implementation. Electrical probe method is one of the most widely used and informative methods of plasma diagnostics which allows to establish its local characteristics.

To investigate the potential distribution, temperature and concentration of positive particles in the section of the plasma flow used single electrical probe, which is a tungsten wire with a diameter of 0.3 mm and a length of 2 mm, placed in an alundum insulators.

As a result of probing the plasma flow were obtained dependences of the ionization degree and the positive ions concentration of the material implantation from the temperature. Found that by using the developed plasmotrons for the process of ion-plasma treatment of the glass surface greatly increases the positive ions concentration of the material implantation and the degree of ionization the plasma flow.

Keywords: ion, low-temperature plasma, an electric probe, current-voltage characteristic, glass.

Введение

Изменение поверхностных свойств стеклоизделий с использованием плазменной обработки – прогрессивный технологический метод, который позволяет получать поверхностный слой с заданными физическими свойствами, уменьшить время обработки стекла и сократить расход электроэнергии [1–3]. Для выбора технологических параметров ионно-плазменной обработки поверхности стекла при атмосферном давлении необходимо исследовать изменение потенциала плазменного потока и оценить концентрацию положительных ионов материала внедрения. Зондовый метод является одним из наиболее широко используемых и информативных методов диагностики плазмы, позволяющий определить ее локальные характеристики [4–7].

Методика эксперимента

Для исследования распределения потенциала, температуры и концентрации положительных частиц по сечению плазменного потока использовался одиночный электрический зонд, представляющий собой вольфрамовую проволоку диаметром 0,3 мм и длиной 2 мм, помещенную в алундовые изоляторы (рис. 1).

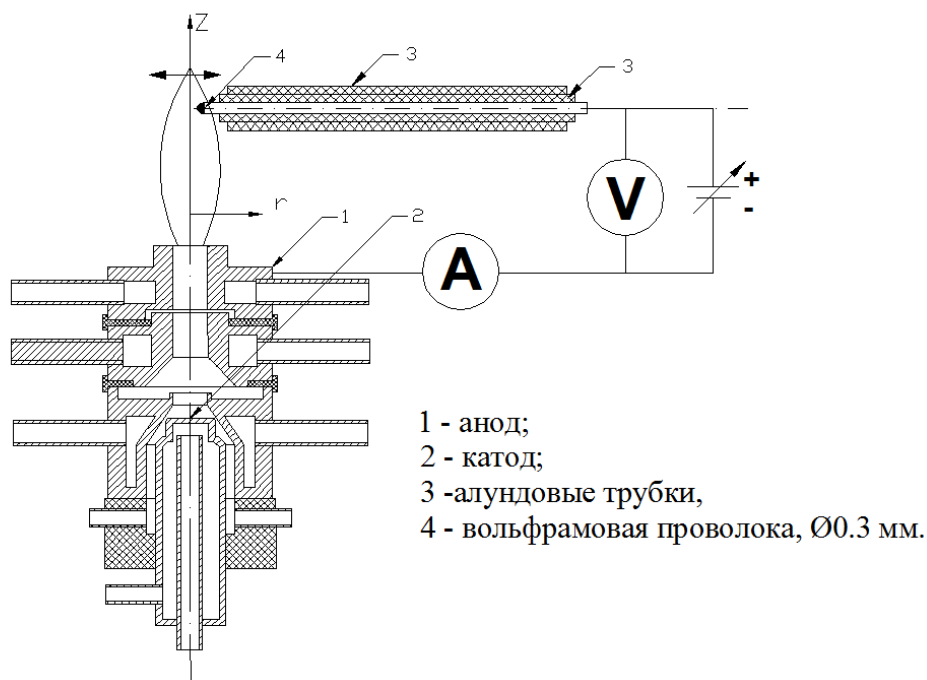


Рис. 1. Принципиальная схема установки для снятия ВАХ одиночного электрического зонда

Электрический зонд вводился в плазменный поток с помощью электромагнита, позволяющего с высокой скоростью и точностью вводить зонд в определенную точку плазменного потока. Плавная регулировка выдержки времени нахождения зонда в плазменном потоке позволяла предохранить его от возможного перегрева. Регистрация показаний электрического зонда осуществлялась с помощью внешнего устройства аналогово-цифрового преобразования ЛА-50USB с дальнейшей обработкой сигнала при помощи персонального компьютера.

В табл. 1 представлены экспериментальные данные, полученные при снятии ВАХ одиночного электрического зонда.

Таблица 1

Экспериментальные данные

U, В	-10	-5	0	5	10	15	17	20	23
I, mA	-1.7	-1.71	-1.7	-1.62	-1.6	-1.6	-1.0	-0.8	-0.6
U, В	25	30	35	40	45	50	55	57	60
I, mA	0.4	128	145	150	159	171	173	175	176

Изменение потенциала плазменного потока и ВАХ одиночного электрического зонда представлены на рис. 2, рис. 3.

При напряжениях близких к потенциалу плазмы вклад ионов невелик и почти весь ток электронный. Пренебрегая ионной частью тока получаем:

$$T_e = \frac{e}{k} \cdot \frac{1}{\frac{d \ln I}{dU}}, \quad (1)$$

где e – заряд электрона, $e = 1,602177 \cdot 10^{-19}$ Кл;
 k – постоянная Больцмана, $k = 1,380658 \cdot 10^{-23}$ Дж*К⁻¹.

Таким образом, если отложить ток электронов на графике в полулогарифмическом масштабе в зависимости от напряжения, то по наклону графика можно определить температуру электронов [8, 9]:

$$T_e = \frac{e}{k} \cdot \frac{1}{\tan \psi}, \tag{2}$$

где ψ – угол наклона прямолинейного участка графика.

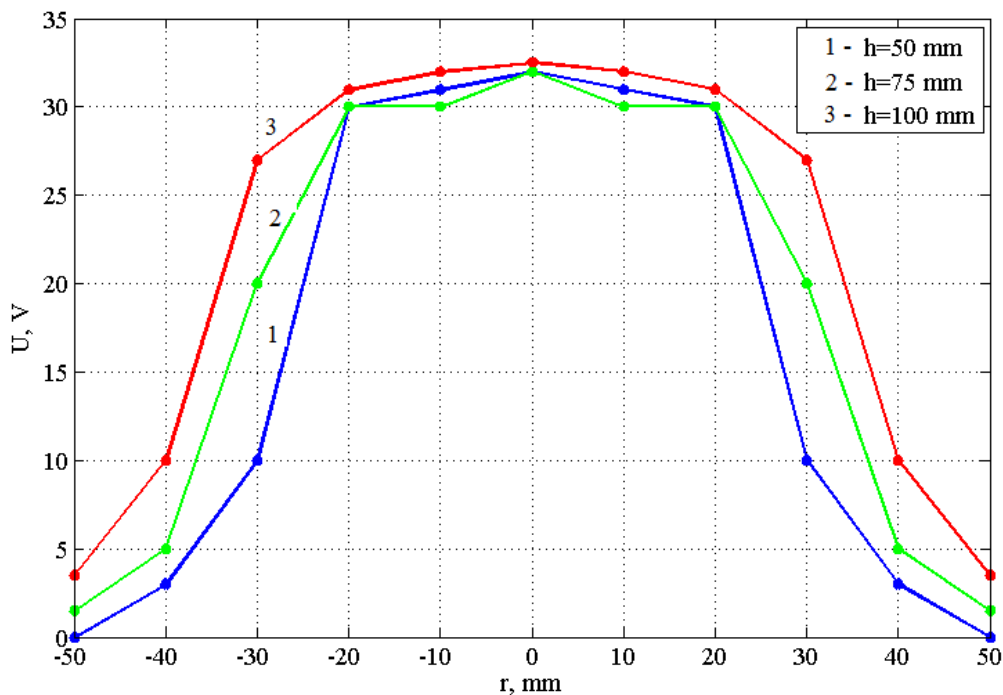


Рис. 2. Изменение потенциала плазменного потока (r – радиальное расстояние от среза сопла плазматрона, мм; U – напряжение зонда, В; h – дистанция обработки, мм)

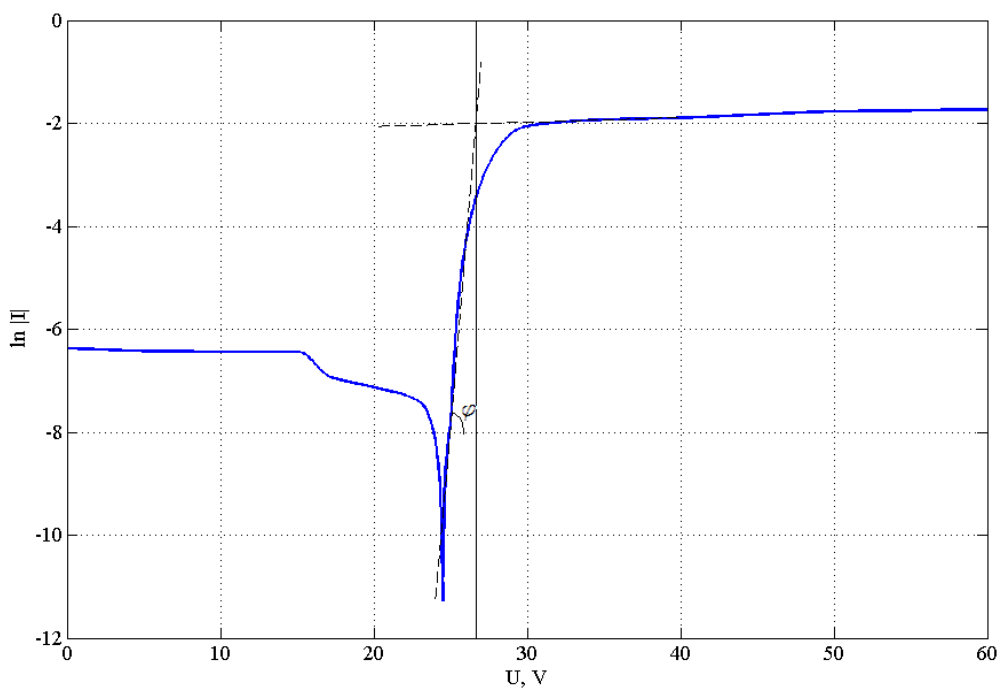


Рис. 3. ВАХ зонда в полулогарифмическом масштабе:
 $U = 165$ В, $I = 110$ А, $h = 40$ мм, $r = 20$ мм.

Из ВАХ зонда в полулогарифмическом масштабе (рис. 3) при $U = 25 В$, $\ln |I| = -7,824$, при $U = 26 В$ $\ln |I| = -4,323$ температура плазменного потока составляет $T_e = 3\,314,61 К$, что удовлетворительно коррелирует с измерениями плазменного потока нестационарным методом динамической термопары [10].

В случае изотермической плазмы ($T_i = T_e$) для вычисления концентрации заряженных частиц воспользуемся следующим выражением [6–8]:

$$n_i = \frac{I_i}{1.47 \cdot l \cdot R_0 \cdot e} \cdot \left(\frac{M_i}{8kT} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где I_i – ионный ток насыщения, измеренный при достаточно большом напряжении на зонде, А;

l – длина зонда, м;

R_0 – радиус зонда, м;

e – заряд электрона, $e = 1,602177 \cdot 10^{-19}$ Кл;

k – постоянная Больцмана, $k = 1,380658 \cdot 10^{-23}$ Дж*К⁻¹.

T – температура плазменного потока, К;

M_i – масса заряженных частиц, кг.

$$n_i = 1.2916 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3} = 1.2916 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}.$$

Выводы

В результате зондирования плазменного потока были получены зависимости степени ионизации и концентрации положительных ионов материала внедрения от температуры (рис. 4, рис. 5).

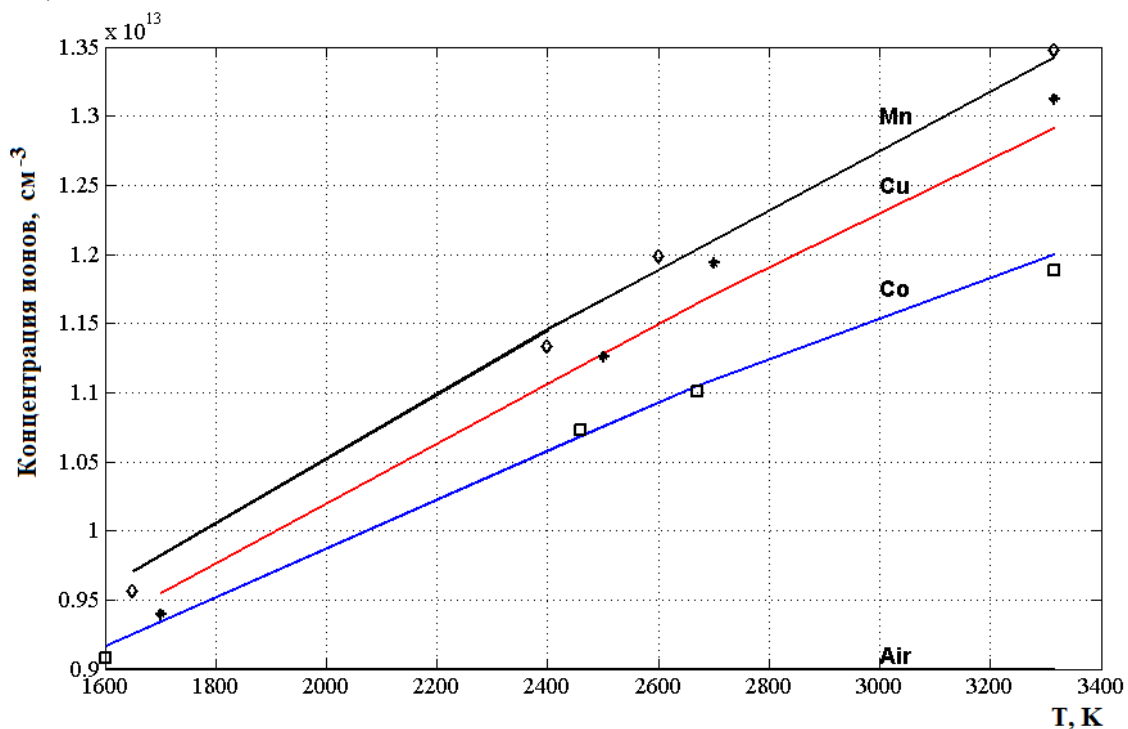


Рис. 4. Зависимость концентрации положительных ионов материала внедрения от температуры

Установлено, что при использовании разработанных плазмотронов для организации процесса ионно-плазменной обработки поверхности стекла существенно повышается концентрация положительных ионов материала внедрения и степени ионизации плазменного потока.

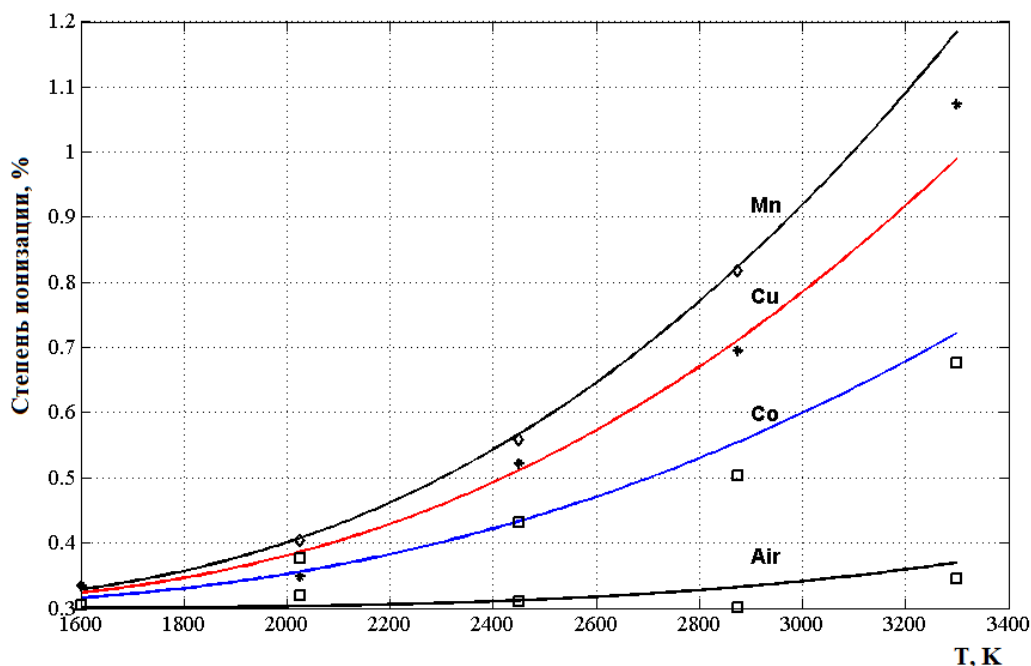


Рис. 5. Зависимость степени ионизации плазменного потока от температуры

На основании зондовой методики установлены граничные величины силы тока плазменной дуги при максимальной концентрации ионов: при токах 100–105 А концентрация ионов меди составляет $1,2916 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, при токах 104–110 А концентрация ионов кобальта – $1,21 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. В диапазоне рабочих температур 3000–3200 К степень ионизации плазменного потока составляет 0,6 – 0,68 % при работе с водным раствором солей кобальта, 0,8 – 0,9% при работе плазмотрона с водным раствором солей меди и 0,91–1,1 % – при работе с водным раствором солей марганца.

Список использованной литературы:

1. Chen F. F. Principles of plasma processing [Text] / Fransis F. Chen, Jane P. Chang. – Los Angeles : Plenum/Kluwer Publishers, 2002. – 249 p.
2. Fridman A. Plasma Chemistry [Text] / Alexander Fridman. – Cambridge : Cambridge University Press, 2008. – 1022 p. – ISBN-13 978-0-511-39857-5.
3. Физика и техника низкотемпературной плазмы / [С. В. Дресвин, А. В. Донской, В. М. Гольдфарб, В. С. Клубникин]; под общ. ред. С. В. Дресвина. – М. : Атомиздат, 1972. – 352 с.
4. Магунов А. Н. Теплообмен неравновесной плазмы с поверхностью [Текст] / А. Н. Магунов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 312 с. – ISBN 5-9221-0599-X.
5. Hutchinson I. H. Principles of plasma diagnostics [Text] / I. H. Hutchinson. – 2nd edition. – Cambridge : Cambridge University Press, 2005. – 460 p.
6. Conde L. An introduction to Langmuir probe diagnostics of plasma [Text] / Luis Conde. – Madrid : Dept. Física. E.T.S.I. Aeronáuticos Universidad Politécnica de Madrid, 2011. – 28 p.
7. Chen F. F. Langmuir probe diagnostics [Text] / Fransis F. Chen. – Jeju : IEEE-ICOPS, 2003. – 42 p.
8. Свойства низкотемпературной плазмы и методы ее диагностики / [под ред. М. Ф. Жукова]. – Новосибирск : Наука, 1977. – 295 с.
9. Андреев В. Л. Диагностика плазмы зондами проводимости : Учеб. Пособие [Текст] / В. Л. Андреев, И. В. Брагин, В. Ф. Михайлов. – СПб. : СПбГУАП, 2000. – 104 с. : с ил.
10. Авдеев И. В. Электротехнический комплекс для измерения температур плазменных потоков при поверхностной модификации стекла / И. В. Авдеев, А. А. Шрам // Электротехника и электроэнергетика. – Запорожье, 2012. – № 2. – С. 49–51.

References:

1. Chen F. F. Principles of plasma processing [Text] / Fransis F. Chen, Jane P. Chang. – Los Angeles : Plenum/Kluwer Publishers, 2002. – 249 p.
2. Fridman A. Plasma Chemistry [Text] / Alexander Fridman. – Cambridge : Cambridge University Press, 2008. – 1022 p. – ISBN-13 978-0-511-39857-5.
3. Fizika i tehnika nizkotemperaturnoj plazmy / [S. V. Dresvin, A. V. Donskoj, V. M. Gol'dfarb, V. S. Klubnikin]; pod obshh. red. S. V. Dresvina. – M. : Atomizdat, 1972. – 352 s.

4. Magunov A. N. Teploobmen neravnesnoj plazmy s poverhnost'ju [Tekst] / A. N. Magunov. – M. : FIZMATLIT, 2005. – 312 s. – ISBN 5-9221-0599-X.
5. Hutchinson I. H. Principles of plasma diagnostics [Text] / I. H. Hutchinson. – 2nd edition. – Cambridge : Cambridge University Press, 2005. – 460 p.
6. Conde L. An introduction to Langmuir probe diagnostics of plasma [Text] / Luis Conde. – Madrid : Dept. Física. E.T.S.I. Aeronáut ngenieros Aeronáuticos Universidad Politécnica de Madrid, 2011. – 28 p.
7. Chen F. F. Langmuir probe diagnostics [Text] / Fransis F. Chen. – Jeju : IEEE-ICOPS, 2003. – 42 p.
8. Svoystva nizkotemperaturnoj plazmy i metody ee diagnostiki / [pod red. M. F. Zhukova]. – Novosibirsk : Nauka, 1977. – 295 p.
9. Andreev V. L. Diagnostika plazmy zondami provodimosti : Ucheb. Posobie [Tekst] / V. L. Andreev, I. V. Bragin, V. F. Mihajlov. – SPb. : SPbGUAP, 2000. – 104 p. : p il.
10. Avdeev I. V. Jeletrotehnicheskij kompleks dlja izmerenija temperatur plazmennyh potokov pri poverhnostnoj modifikacii stekla / I. V. Avdeev, A. A. Shram // Jeletrotehnika i jelektrojenergetika. – Zaporozh'e, 2012. – № 2. – P. 49–51

Поступила в редакцию 10.11 2014 г.