

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИСТОЧНИК ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

**Н.П. Полуэктов, И.И. Усатов, А.А. Андросюк,
А.Л. Сербинов, Т.А. Мазаева, А.Н. Посевин**

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

poluekt@mgu.ac.ru

Разработан источник высокочастотного (ВЧ) разряда, который можно использовать для очистки металлических и диэлектрических подложек, а также при осаждении тонких пленок. Приведено описание принципиальной схемы источника высокочастотного разряда, схемы предусилителя и усилителя данной системы. Проведены испытания данной системы, которые показали ее устойчивую работу на плазменной установке.

Ключевые слова: источник ВЧ разряда, напряжение смещения, плазменные технологии, тонкие пленки

Ссылка для цитирования: Полуэктов Н.П., Усатов И.И., Андросюк А.А., Сербинов А.Л., Мазаева Т.А., Посевин А.Н. Высокочастотный источник газового разряда // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 1. С. 111–116. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-1-111-116

При плазменном осаждении тонких пленок (0,1...1,0 мкм) большое влияние на качество получаемых пленок оказывает чистота поверхности. Наличие примесей на подложке негативно влияет на адгезию пленки, и другие физические и электрические характеристики.

Кроме того, качество получаемых пленок зависит от энергии поступающих на подложку атомов и ионов. Подавая отрицательное напряжение порядка сотен вольт на подложку, можно ускорять приходящие ионы металла и получать пленки с более высокой плотностью и адгезией. В случае если подложка состоит из изолирующего материала, то постоянное отрицательное напряжение не даст эффекта, поскольку накопленный положительный заряд будет препятствовать дальнейшему ускорению ионов. Тогда необходимо подавать переменное напряжение. При положительном потенциале подложки на нее поступают электроны, а при отрицательном — ионы. Поскольку подвижность электронов выше, чем ионов, отрицательный заряд положительного полупериода значительно превышает положительный заряд отрицательного полупериода. В результате средняя линия синусоиды смещается в отрицательный потенциал, и величина этого потенциала называется напряжением смещения.

Цель работы

Цель работы — создание высокочастотного (ВЧ) источника напряжения смещения на подложке.

Объект исследования

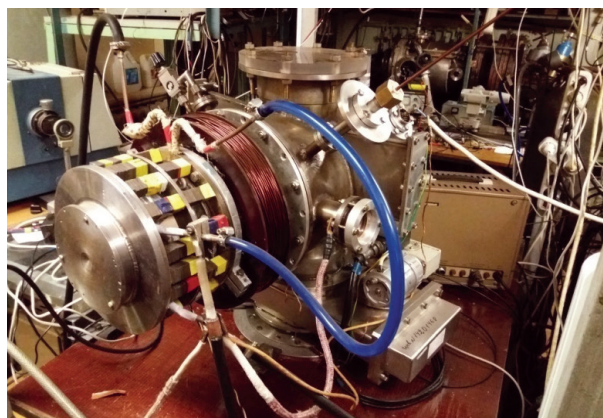
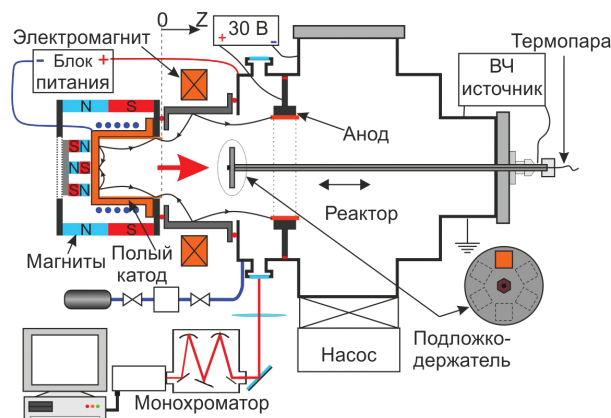
В лаборатории кафедры К6 МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал) создана плазменная установка — магнетрон с полым катодом (МПК), предназначенная для осаждения

пленок металлов и их соединений (оксидами и нитридами) [1–4]. В магнетронном разряде в результате бомбардировки катода-мишени положительными ионами инертного газа происходит выбивание атомов металла, которые осаждаются на подложке. Особенностью разряда МПК, работающего в режиме постоянного тока, является высокая концентрация плазмы (более 10^{11} см⁻³ при давлении 0,13...5 Па вплоть до расстояния 30 см от выходного сечения МПК. При таких характеристиках плазмы атомы металла, вылетающие из катода-мишени, имеют большую вероятность ионизоваться на их пути от мишени к подложке. Тогда ионы металла можно ускорять напряжением, подаваемым на подложку. Установки на основе данного разряда широко применяются за рубежом для создания адгезионных, диффузионных и затравочных слоев в канавках (трэнчах) и межслойных отверстиях современных ультрабольшин интегральных схем (УБИС) [18–22].

Схема и фото установки приведены на рис. 1. Катод МПК выполнен в виде закрытого с одного конца цилиндра (диаметр — 14 см, длина — 11 см), изготовленного из меди и охлаждаемого водой. В него можно вставлять цилиндрические мишени из различных металлов. Камера откачивается турбомолекулярным насосом до давления 10^{-3} Па, затем через электронный регулятор расхода (25...50 см³/мин) напускается аргон до давления 1,3 Па.

Источник мощных импульсов, разработанный в лаборатории кафедры К6, имеет напряжение до 900 В, максимальная сила тока — 150 А, длительность импульса — 50...350 мкс, частота — 100 Гц.

На держатель подложек подается высокочастотный разряд с помощью источника, описание которого приводится ниже.



а

б

Рис. 1. Схема (а) и фото (б) экспериментальной установки
 Fig. 1. Scheme (a) and photo (б) of the pilot unit

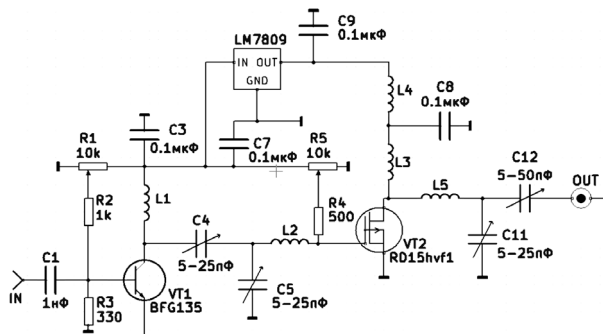
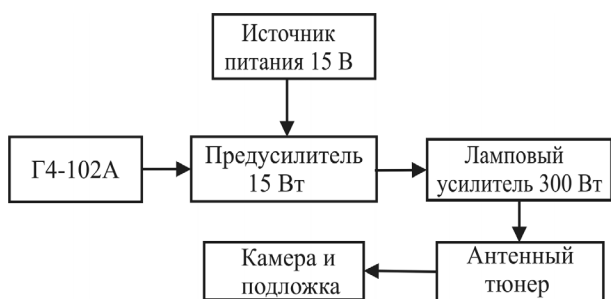


Рис. 2. Блок-схема системы высокочастотного источника напряжения
 Fig. 2. System block diagram of a high frequency voltage source

Рис. 4. Схема предусилителя
 Fig. 4. Preamplifier circuit

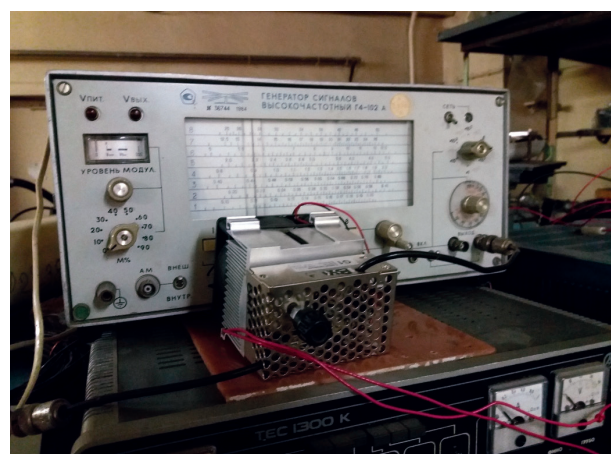


Рис. 3. Задающий генератор Г4-102 и предусилитель
 Fig. 3. The master oscillator G4-102 and preamplifier

Рис. 5. Ламповый усилитель
 Fig. 5. Tube amplifier

Описание источника высокочастотного разряда

Принципиальная схема источника показана на рис. 2.

Генератор синусоидальных напряжений Г4-102А, настроенный на промышленную частоту

13,56 МГц, выдает синусоиду с амплитудой 1 В. Так как ламповый усилитель не может усилить сигнал, поступающий с генератора синусоидальных напряжений Г4-102А, менее чем в 7 В необходимо подключить к нему предусилитель (рис. 3), который повышает сигнал с 1 В до 17 В.

Генератор синусоидальных напряжений Г4-102А через разделительный конденсатор С1 подает на базу биполярного транзистора VT1 синусоидальное напряжение частотой 13,56 МГц (рис. 4). Делитель напряжения, состоящий из резисторов R1...R3, создает необходимое смещение на транзисторе VT1.

Фильтр, состоящий из катушки L1 и конденсатора С3, предназначен для исключения составляющей питающего транзистор напряжения. Переменный ток, возникающий в цепи база — эмиттер транзистора VT1, усиливается и поступает на коллектор транзистора VT1. С коллектора транзистора VT1 через LC-фильтр, состоящий из конденсаторов С4, С5 и катушки L2, усиленный сигнал нужной частоты поступает на затвор полевого транзистора с изолированным затвором VT2. Рабочее состояние VT2 устанавливается с помощью делителя, состоящего из резисторов R4 и R5. Изменение усиленных сигналов напряжения, приложенного к затвору VT2, создает переменное напряжение в цепи сток — исток VT2 и через фильтр, состоящий из катушки L5 и конденсаторов С11 и С12, поступает на выход схемы. Транзистор VT2 питается от источника напряжения через фильтр, уменьшая переменную составляющую напряжения. Фильтр собран из индуктивностей L3, L4 и конденсатора С8. Питание транзистора VT1 осуществляется от линейного стабилизатора, выполненного на микросхеме LM7809.

Рассмотрим принцип работы лампового усилителя (рис. 5, 6). Усиленный сигнал с предусилителя поступает на управляющую сетку лампы ГУ-29 через ограничивающие резисторы R1, R2. Резистор R3 позволяет менять амплитуду поступающего сигнала. В цепи анод — катод лампы возникает переменный ток, усиливающийся с помощью ускоряющей сетки, на которую поступает напряжение +225 В. Ток ускоряющей сетки контролируется миллиамперметром. Усиленный сигнал с анода лампы через RLC фильтр, состоящий из катушки L3, резистора R6 и конденсатора С5, подается на П-образный контур, включающий в себя переменные конденсаторы С6, С7 и катушку L1, который согласует усилитель с нагрузкой и регулирует амплитуду усиленного сигнала. Дроссель Др.1 с конденсатором С1 фильтруют постоянное питающее напряжение лампы от переменной составляющей. Стабилизаторы Д815Д с конденсатором С2 стабилизируют напряжение накала лампы.

Усилитель собран на сдвоенной лампе ГУ-29. Он усиливает сигнал до мощности в 300 Вт. Максимальная амплитуда равна напряжению питания лампы (650 В). Переменный сигнал такой большой мощности эффективно поджигает разряд и очищает подложку, на которую наносятся пленки.

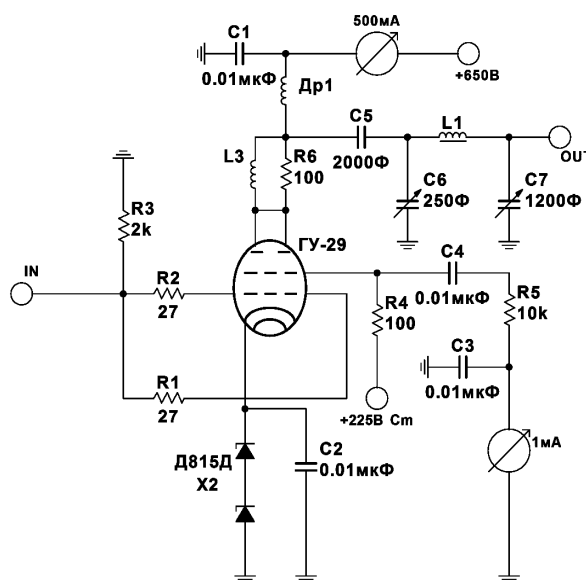


Рис. 6. Схема усилителя
Fig. 6. Amplifier circuit



Рис. 7. Антенный тюнер MFJ-989D
Fig. 7. Antenna tuner MFJ-989D

Сигнал с усилителя подается на подложкодержатель через антенный тюнер MFJ-989D (рис. 7), который служит для согласования нагрузки главного генератора.

Мощный антенный тюнер MFJ-989D может согласовывать симметричные и несимметричные нагрузки при выходной мощности усилителя в режиме CW, несущей до 1500 Вт. Переменная индуктивность тюнера MFJ-989D оснащена верньером с замедлением и счетчиком числа оборотов. Двухстрелочный измерительный прибор тюнера MFJ-989D отображает без предварительной калибровки величину коэффициента стоячей волны (КСВ), прямой и отраженной мощности. Шестипозиционный переключатель тюнера MFJ-989D позволяет выбрать между двумя независимыми антеннами (через тюнер или в обход), встроенным эквивалентом нагрузки и симметричной антенны. Выходы симметричной линии тюнера MFJ-989D расположены на керамических проходных изоляторах. Возможно и подключение

антенны типа «длинный луч» с питанием однопроводной линией. Симметрирующий трансформатор тюнера MFJ-989D выполнен по «токовой» схеме, которая дает более высокую точность симметрирования при небольшом дисбалансе нагрузки. На передней панели тюнера MFJ-989D расположены переключатели пределов измерения, выбора измерения пиковой или средней мощности, включения подсветки прибора.

Выводы

Приведено описание источника ВЧ разряда, который предназначен для создания напряжения смещения на подложке при осаждении пленок в магнетронном разряде. Ионы газа и металлов мишени с энергией сотни вольт используются для очистки подложек, а также повышения качества получаемых пленок. Описана принципиальная схема работы источника ВЧ разряда. Приведены схемы с описанием принципа работы предусилителя и усилителя. Данная система испытана, и показала устойчивую работу на плазменной установке — магнетрон с полым катодом.

Список литературы

- [1] Царьгородцев Ю.П., Полуэктов Н.П., Усатов И.И., Евстигнеев А.Г., Камышов И.А. Степень ионизации потока распыленных атомов металла в магнетроне с полым катодом // Физика плазмы, 2014. Т. 40. № 9. С. 857–864.
- [2] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kamyschov I.A. Plasma parameters of the hollow cathode magnetron inside and downstream // Plasma Sources Science and Technology, 2015, v. 24, p. 035009.
- [3] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G. Energy flux to the substrate in a magnetron discharge with hollow cathode // Thin Solid Films, 2017, v. 640, pp. 60–66.
- [4] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kozlovskaya E.P., Amel'kin O.O. Study of plasma dynamics in a pulsed hollow cathode magnetron // J. of Physics: Conf. Series., 2018, v. 1121, p. 012024 (1–5).
- [5] Царьгородцев Ю.П., Полуэктов Н.П., Усатов И.И., Евстигнеев А.Г., Козловская Е.П., Амеликин О.О. Исследование ионизации атомов металла в магнетроне с полым катодом // Физика плазмы, 2019. Т. 45. С. 558–567.
- [6] Klawuhn E., D'Couto G.C., Ashtiani K.A. Ionized physical-vapor deposition using a hollow-cathode magnetron source for advanced metallization // J. Vac. Sci. Technol., 2000, v. 18A, no. 4, pp. 1546–1549.
- [7] Wu L., Ko E., Dulkin A., Park K.J., Fields S., Leeser K., Meng L., Ruzic D.N. Flux and energy analysis of species in hollow cathode magnetron ionized physical vapor deposition of copper // Rev. Sci. Instrum., 2010, v. 81, p. 123502.
- [8] Vyas V., Kushner M. J. Scaling of hollow cathode magnetrons for ionized metal physical vapor deposition // J. Vac. Sci. Technol., 2006, v. 24A, p. 1955.
- [9] Dulkin A., Ko E., Wu L., Karim I., Leeser K., Park K.J., Meng L., Ruzic D.N. Improving the quality of barrier/seed interface by optimizing physical vapor deposition of Cu Film in hollow cathode magnetron // J. Vac. Sci. Technol., 2011, v. 29 A, p. 041514.
- [10] Meng L., Matthew H.Yu., Szott M., McLain J. T., Ruzic D.N. Downstream plasma transport and metal ionization in a high-powered pulsed-plasma magnetron // J. Appl. Phys., 2014, v. 115, p. 223301.
- [11] Huq H.F., Garza Ro. Y., Garcia-Perez R. Characteristics of GaN Thin Films Using Magnetron Sputtering System // J. Modern Phys., 2016, v. 7, pp. 2028–2037.
- [12] Nakao S., Yukimura K., Nakano S., Ogiso H. DLC Coating by HiPIMS: The Influence of Substrate Bias Voltage // IEEE Trans. plasma science, 2013, v. 12, pp. 1–12.
- [13] Rank R., Wunsche T., Günther S. Magnetically enhanced RF discharges for effective pre-treatment of plastic webs at high speed // Surface and Coatings Technology, 2003, v. 174–175, pp. 218–221.
- [14] Mavrodineanu R., Hughes R.C. Excitation in radio-frequency discharges // Spectrochimica Acta. 1963. v. 19. pp. 1309–1317.
- [15] Homma Y., Tsunekawa S. Planar Deposition of Aluminum by RF/DC Sputtering with RF Bias // J. Electrochemical Society, 1985, v. 24, pp. 344–350.
- [16] Zhang Z.G., Rapaud O., Bonasso N. Influence of RF Bias on the Deposition of CrN Studied by OES // Advanced Engineering Materials, 2008, v. 34, pp. 234–238.
- [17] Averkin S.N., Gatsonis N.A., Olson L. Investigation of the Radio-Frequency Discharge in a High Current Negative Hydrogen Ion Source // IEEE Trans. on Plasma Science, 2017, v. 45, pp. 2460–2471.
- [18] Yukimura K., Konishi T., Takaki K., Nakao S. Fabrication of diamond-like carbon films using short-pulse HiPIMS // Surface and Coatings Technology, 2015, v. 195, pp. 218–221.
- [19] Морган Дж. Ламповые усилители. М.: ДМК-Пресс, 2013. 624 с.
- [20] Карсон Р. Высокочастотные усилители / пер. с англ. В.Ф. Ткаченко. М.: Радио и связь, 1981. 216 с.
- [21] Tucker M.D., Putman K.J., Ganesan R. The behaviour of arcs in carbon-mixed-mode high-power impulse magnetron sputtering // J. Phys. D: Appl. Phys., 2017, v. 50, pp. 145–155.
- [22] Зельдин И.Л., Марцын В.Г., Моргун В.В., Трясоруков В.Г. Ламповые усилители ВЧ. Теория и практика. Харьков: Торнадо, 2001. 144 с.
- [23] Климов Д.А. Ламповые усилители. Методика расчета и конструирования. М.: Радио и связь, 2002. 88 с.
- [24] Снедков Б.А. Основы теории и расчета генераторов высокой частоты. М.: [б.и.], 1993. 63 с.
- [25] Ganesan R., McCulloch D.G., Marks N.A. Synthesis of highly tetrahedral amorphous carbon by mixed-mode HiPIMS sputtering // J. Phys. D: Appl. Phys., 2015, v. 48, p. 442001.
- [26] Mishra A., Kelly P.J., Bradley J.W. The evolution of the plasma potential in a HiPIMS discharge and its relationship to deposition rate // Plasma Sources Sci. Technol., 2010, v. 19, pp. 150–158.

Сведения об авторах

Полужков Николай Павлович — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), poluekt@mgul.ac.ru

Усатов Игорь Игоревич — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), caf-physics@mgul.ac.ru

Андросюк Алексей Александрович — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), diadia.yzhik@yandex.ru

Сербинов Алексей Леонидович — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), diadia.ejik@yandex.ru

Мазаева Татьяна Андреевна — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), Tanya_Mazeva17@mail.ru

Посевин Александр Николаевич — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), sasha_posevin@mail.ru

Поступила в редакцию 19.09.2019.

Принята к публикации 13.11.2019.

HIGH FREQUENCY GAS DISCHARGE SOURCE

**N.P. Poluektov, I.I. Usatov, A.A. Androsyuk,
A.L. Serbinov, T.A. Mazaeva, A.N. Posevin**

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

poluekt@mgul.ac.ru

A source of high-frequency (HF) discharge has been developed, which can be used both for cleaning metal, dielectric substrates and thin-film deposition. A description of a circuit schematic of a high-frequency discharge source and a preamplifier and amplifier circuit of this system are given. The system was tested, which showed its stable operation in a plasma installation.

Keywords: HF discharge, bias voltage, plasma technology, thin films

Suggested citation: Poluektov N.P., Usatov I.I., Androsyuk A.A., Serbinov A.L., Mazaeva T.A., Posevin A.N. *Высокочастотный источник газового разряда* [High frequency gas discharge source]. *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 111–116. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-1-111-116

References

- [1] Tsar'gorodtsev Yu.P., Poluektov N.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kamyshev I.A. *Степень ионизации потока расплывенных атомов металла в магнетроне с полим катодом* [The degree of ionization of the stream of atomized metal atoms in a hollow cathode magnetron] *Fizikaplazmy [Fizicaplazmas]*, 2014, v. 40, no. 9, pp. 857–864.
- [2] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kamyshev I.A. Plasma parameters of the hollow cathode magnetron inside and downstream. *Plasma Sources Science and Technology*, 2015, v. 24, p. 035009.
- [3] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G. Energy flux to the substrate in a magnetron discharge with hollow cathode. *Thin Solid Films*, 2017, v. 640, pp. 60–66.
- [4] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kozlovskaya E.P., Amel'kin O.O. Study of plasma dynamics in a pulsed hollow cathode magnetron. *J. of Physics: Conf. Series.*, 2018, v. 1121, p. 012024 (1–5).
- [5] Tsar'gorodtsev Yu.P., Poluektov N.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kozlovskaya E.P., Amel'kin O.O. *Исследование ионизации атомов металла в магнетроне с полим катодом* [Investigation of the ionization of metal atoms in a hollow-cathode magnetron] *Fizikaplazmy [Fizicaplazmas]*, 2019, v. 45, pp. 558–567.
- [6] Klawuhn E., D' Couto G.C., Ashtiani K.A. Ionized physical-vapor deposition using a hollow-cathode magnetron source for advanced metallization. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2000, v. 18A, no. 4, pp. 1546–1549.
- [7] Wu L., Ko E., Dulkan A., Park K.J., Fields S., Leaser K., Meng L., Ruzic D.N. Flux and energy analysis of species in hollow cathode magnetron ionized physical vapor deposition of copper. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, v. 81, p. 123502.
- [8] Vyas V., Kushner M. J. Scaling of hollow cathode magnetrons for ionized metal physical vapor deposition. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2006, v. 24A, p. 1955.
- [9] Dulkan A., Ko E., Wu L., Karim I., Leaser K., Park K.J., Meng L., Ruzic D.N. Improving the quality of barrier/seed interface by optimizing physical vapor deposition of Cu Film in hollow cathode magnetron. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2011, v. 29 A, p. 041514.
- [10] Meng L., Matthew H.Yu., Szott M., McLain J. T., Ruzic D.N. Downstream plasma transport and metal ionization in a high-powered pulsed-plasmamagnetron. *J. Appl. Phys.*, 2014, v. 115, p. 223301.
- [11] Huq H.F., Garza Ro. Y., Garcia-Perez R. Characteristics of GaN Thin Films Using Magnetron Sputtering System. *J. Modern Phys.*, 2016, v. 7, pp. 2028–2037.

- [12] Nakao S., Yukimura K., Nakano S., Ogiso H. DLC Coating by HiPIMS: The Influence of Substrate Bias Voltage. *IEEE Trans. plasma science*, 2013, v. 12, pp. 1–12.
- [13] Rank R., Wünsche T., Günther S. Magnetically enhanced RF discharges for effective pre-treatment of plastic webs at high speed. *Surface and Coatings Technology*, 2003, v. 174–175, pp. 218–221.
- [14] Mavrodineanu R., Hughes R.C. Excitation in radio-frequency discharges. *Spectrochimica Acta*. 1963. v. 19. pp. 1309–1317.
- [15] Homma Y., Tsunekawa S. Planar Deposition of Aluminum by RF/DC Sputtering with RF Bias. *J. Electrochemical Society*, 1985, v. 24, pp. 344–350.
- [16] Zhang Z.G., Rapaud O., Bonasso N. Influence of RF Bias on the Deposition of CrN Studied by OES. *Advanced Engineering Materials*, 2008, v. 34, pp. 234–238.
- [17] Averkin S.N., Gatsonis N.A., Olson L. Investigation of the Radio-Frequency Discharge in a High Current Negative Hydrogen Ion Source. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2017, v. 45, pp. 2460–2471.
- [18] Yukimura K., Konishi T., Takaki K., Nakao S. Fabrication of diamond-like carbon films using short-pulse HiPIMS. *Surface and Coatings Technology*, 2015, v. 195, pp. 218–221.
- [19] Morgan J. *Lampovye usiliteli* [Tube Amplifiers]. Moscow: DMK-Press, 2013, 624 p.
- [20] Karson R. *Ysokochastotnye usiliteli* [High Frequency Amplifiers]. Moscow: Radio and communications, 1981, 216 p.
- [21] Tucker M.D., Putman K.J., Ganesan R. The behaviour of arcs in carbonmixed-mode high-power impulsemagnetron sputtering // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2017, v. 50, pp. 145–155.
- [22] Zel'din I.L., Martsyn V.G., Morgun V.V., Tryasorukov V.G. *Lampovye usiliteli VCh. Teoriya i praktika* [RF tube amplifiers. Theory and practice]. Kharkov: Tornado, 2001, 144 p.
- [23] Klimov D.A. *Lampovye usiliteli. Metodika rascheta i konstruirovaniya* [Tube amplifiers. Methodology of calculation and design]. Moscow: Radio and communications, 2002, 88 p.
- [24] Snedkov B.A. *Osnovy teorii i rascheta generatorov vysokoy chastoty* [Fundamentals of the theory and calculation of high-frequency generators]. Moscow, 1993, 63 p.
- [25] Ganesan R., McCulloch D.G., Marks N.A. Synthesis of highly tetrahedral amorphous carbon by mixed-mode HiPIMS sputtering. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2015, v. 48, p. 442001.
- [26] Mishra A., Kelly P.J., Bradley J.W. The evolution of the plasma potential in a HiPIMS discharge and its relationship to deposition rate. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2010, v. 19, pp. 150–158.

Authors' information

Poluektov Nikolay Pavlovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch),
poluekt@mgul.ac.ru

Usatov Igor' Igorevich — Cand. Sci.(Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch),
caf-physics@mgul.ac.ru

Androsyuk Aleksey Aleksandrovich — Student of the BMSTU (Mytishchi branch),
diadia.yzhik@yandex.ru

Serbinov Aleksey Leonidovich — Student of the BMSTU (Mytishchi branch), diadia.ejik@yandex.ru

Mazaeva Tat'yana Andreevna — Student of the BMSTU (Mytishchi branch), Tanya_Mazeval7@mail.ru

Posevin Aleksandr Nikolaevich — Student of the BMSTU (Mytishchi branch), sasha_posevin@mail.ru

Received 19.09.2019.

Accepted for publication 13.11.2019.