

УДК 621.793.18:535.338.1

Научная статья

<https://doi.org/10.32603/2071-8985-2022-15-9-5-11>

Особенности спектров испускания разряда магнетрона с металлической мишенью в среде аргона

Н. М. Иванов, В. И. Шаповалов✉

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ vishapovalov@mail.ru

Аннотация. Исследованы разряды на постоянном токе в аргоне магнетронов с металлическими мишенями. Изучение выполнено по спектрам испускания разряда. Установлено, что при увеличении тока разряда в диапазоне 0.5...6 А изменения интенсивности линий металла и аргона имеют экспоненциальный характер. При этом интенсивность линий металла аппроксимируется экспонентой с положительным показателем степени, а для линии аргона характерна экспонента, имеющая насыщение. Параметры аппроксимирующих функций зависят от давления аргона в виде полиномов первого порядка. Отмеченные особенности были обнаружены при изучении разряда магнетрона с мишенями из меди, титана и молибдена.

Ключевые слова: магнетрон, мишень, распыление, разряд, спектры испускания

Для цитирования: Иванов Н. М., Шаповалов В. И. Особенности спектров испускания разряда магнетрона с металлической мишенью в среде аргона // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 9. С. 5–11. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-9-5-11.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Peculiarities of the Emission Spectrums of the Magnetron Discharge with a Metal Target in Argon Atmosphere

N. M. Ivanov, V. I. Shapovalov✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ vishapovalov@mail.ru

Abstract. In this work we studied the direct current discharges in argon of magnetrons with metal targets. The study was performed using the emission spectrums of the discharge. It was found that when increasing the discharge current in the range of 0.5...6 A, the intensity changes of metal and argon lines have an exponential character. However, if the intensity of metal lines is approximated by an exponential with a positive exponent, then argon lines are characterized by a saturation exponential. The parameters of the approximating functions depend on the argon pressure in the form of polynomials of the first order. The above features were found when studying the magnetron discharge with copper, titanium, and molybdenum targets.

Keywords: reactive magnetron sputtering, thermochromism, tungsten oxide, vacuum annealing

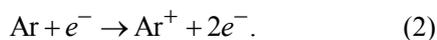
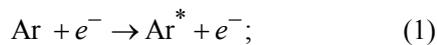
For citation: Ivanov N. M., Shapovalov V. I. Peculiarities of the Emission Spectrums of the Magnetron Discharge with a Metal Target in Argon Atmosphere // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 9. P. 5–11. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-9-5-11.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Оптическая эмиссионная спектроскопия (ОЭС) – это популярный физический инструмент исследования. Метод применяют во многих областях, например для изучения состава объемных материалов [1], характеристики разряда в аргоне [2] и кислороде [3]. С помощью ОЭС исследовали влияние кислорода на спектр испускания разряда в аргоне [4]. ОЭС часто использовали при изучении процессов осаждения тонких пленок: при импульсном лазерном испарении [5], химическом газофазном осаждении, активированном плазмой [6], магнетронном распылении на постоянном токе [7], высокочастотном магнетронном распылении [8], высокомоощном магнетронном распылении [9], [10], реактивном магнетронном распылении при осаждении пленок оксидов [11] и нитридов [12].

Спектры испускания разряда магнетрона с металлической мишенью в среде аргона линейчатые. При их анализе первой задачей становится идентификация наблюдаемых линий. Она облегчается знанием используемых химических элементов, в данном случае – атомов металла M и аргона Ar . Состав среды после инициирования разряда обогащается соответствующими ионизированными и возбужденными атомами. Концентрациями атомов и молекул остаточных газов, а также технических жидкостей, применяемых в средствах откачки, можно пренебречь. Тогда в спектрах испускания должны содержаться линии возбужденных частиц M и Ar , которые обозначают через MI , ArI , MII , $ArII$ и т. д., где римскими цифрами I и II обозначены возбужденные нейтральные атомы и однозарядные ионы соответственно.

Акт возбуждения или ионизации атома аргона наиболее вероятно возникает за счет прямого электронного удара:

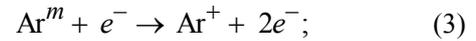


Для идентификации линий испускания атомов применяют диаграммы их энергетических уровней. В видимой области спектра испускания аргона наблюдают линии ArI , соответствующие переходам в состояние $4s$ [7]. Переход в состояние $4s$ возможен за счет как прямого, так и ступенчатого возбуждения (через уровни состояния $4p$ и $5p$ с испусканием фотона). В состоянии $4s$ нейтральный атом аргона имеет четыре энергетических уровня: резонансные $1s_2$ (с энергией 11.83 эВ) и $1s_4$ (11.62 эВ), с которых возможен переход в основное состояние $3p$; метастабиль-

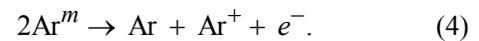
ные $1s_3$ (11.71 эВ) и $1s_5$ (11.55 эВ), переход с которых в основное состояние запрещен [13].

В дополнение к реакции (1) вероятны еще два механизма ионизации атома аргона:

1) двухступенчатая ионизация, при которой метастабильный атом (обозначим его Ar^m), возбужденный по реакции (2), превращается в ион:

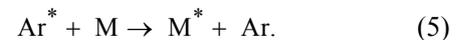


2) два метастабильных атома Ar могут взаимодействовать, чтобы сформировать атом основного состояния, ион аргона и свободный электрон (энергия двух метастабильных атомов аргона не менее $11.55 \cdot 2 = 23.10$ эВ), который превышает ионизационный потенциал аргона 15.76 эВ [4]:



Концентрация метастабильных атомов может достигать очень высокого удельного веса в разряде, поэтому реакции (3) и (4) следует учесть даже при низких давлениях, характерных для распыления на постоянном токе. Многие исследователи, например в [14], [15], в качестве наиболее интенсивных указывают три линии ArI : 750.4, 763.5 и 811.5 нм.

Возбуждение атомов M возможно за счет электронного удара, по аналогии с уравнением (1), или обмена возбужденными состояниями:



Из всех возможных процессов ионизации M наиболее вероятны электронный удар и пеннинговая ионизация [16] с участием метастабильного атома Ar^m :

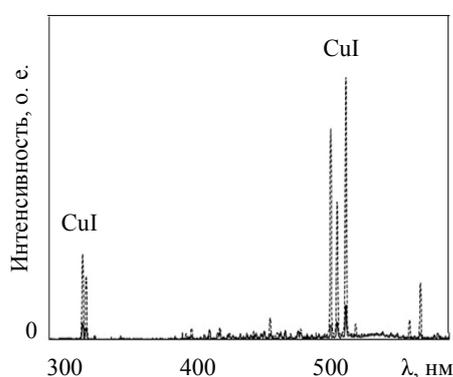


Цель данного исследования состояла в изучении влияния тока разряда и давления аргона на интенсивность линий возбужденных атомов металла и аргона в спектрах испускания разряда магнетрона.

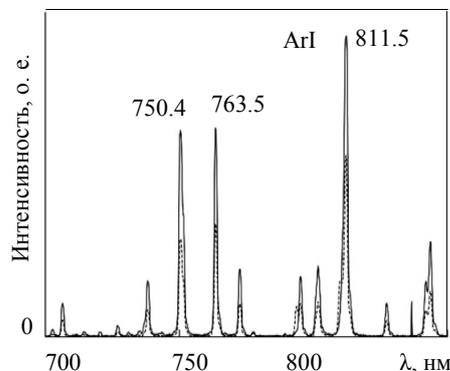
Эксперименты были выполнены в высоковакуумной системе, оснащенной низковокуумным механическим и высоковакуумным диффузионным насосами с быстротой действия 0.005 и 300 м³/с, соответственно. В вакуумной камере объемом $7.8 \cdot 10^{-2}$ м³ остаточное давление не превышало $8 \cdot 10^{-3}$ Па. На камере был установлен цилиндрический несбалансированный магнетрон диаметром 130 мм с металлической мишенью чистотой 0.997 и толщиной 6 мм, охлаждаемой проточной водой. В качестве металлов были использованы

медь, титан и молибден. Магнетрон работал на постоянном токе в среде аргона чистотой 0.999 при постоянном потоке $6.0 \text{ см}^3/\text{мин}$, вводимом в вакуумную камеру. За счет дросселирования откачки затвором рабочее давление аргона в камере устанавливали от 0.2 до 0.8 Па. Эксперименты были выполнены при токе разряда от 0.5 до 6 А.

Спектры испускания разряда вблизи мишени были измерены с помощью малогабаритного спектрометра ISM3600 NK3600 (Nordkraft-Sensor, Russia). Прибор позволял измерять оптические спектры в диапазоне 250...1100 нм с разрешением не более 2.5 нм. Ошибка измерения не превышала $\pm 0.5 \text{ нм}$.



a



б

Рис. 1. Спектры испускания разряда магнетрона в области линий меди (а) и аргона (б) при давлении аргона 0.8 Па и токе (в А): 1.0 – сплошные линии; 5.0 – штриховые линии

Fig. 1. Emission spectrums of the magnetron discharge in the copper (a) and argon (b) at argon pressure of 0.8 Pa and current (in A): 1.0 – solid lines; 5.0 – dashed lines

Выполненные исследования позволили выявить особенности разряда магнетрона, оснащенного металлической мишенью, которые не зависят от используемого металла. Покажем эти особенности на примере разряда магнетрона с медной мишенью. На рис. 1 показаны типичные спектры, измеренные в двух диапазонах длин

волн при токах разряда 1.0 и 5.0 А. Область линий возбужденных атомов меди CuI на рис. 1, а содержит дублет вблизи 300 нм и триплет вблизи 500 нм. В области линий возбужденных атомов аргона ArI на рис. 1, б выделены три наиболее интенсивные линии. Для дальнейшего анализа обратим внимание на линии CuI при 511.4 нм на рис. 1, а и ArI при 750.4 нм на рис. 1, б, которые обозначим через CuI(511) и ArI(750).

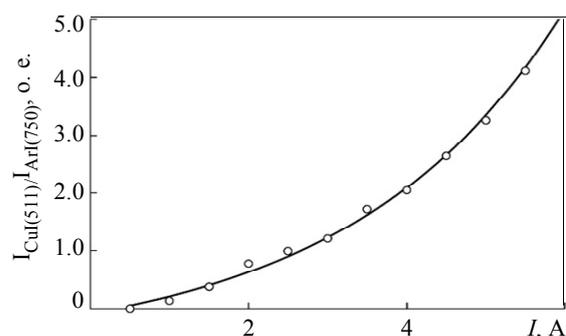


Рис. 2. Влияние тока разряда при давлении аргона 0.4 Па на отношение интенсивностей линий CuI (511) и ArI (750) в спектрах испускания разряда магнетрона (точки – эксперимент; линия – аппроксимация)

Fig. 2. Emission spectrums Effect of discharge current at argon pressure of 0.4 Pa on the ratio of CuI (511) and ArI (750) line intensities in the magnetron discharge

Из рис. 1 видно, что их интенсивности существенно зависят от тока разряда I . При малом токе (сплошные кривые на рис. 1) интенсивность линии ArI(750) значительно больше интенсивности линии CuI(511). При увеличении тока (штриховые кривые на рис. 1) это соотношение изменяется. Более детально для эксперимента при давлении 0.4 Па эту особенность отражает рис. 2. Из него видно, что ток 2.5 А – критический, при нем возникает равенство $I_{\text{CuI}(511)}/I_{\text{ArI}(750)} = 1$. При дальнейшем увеличении тока неравенство $I_{\text{CuI}(511)} < I_{\text{ArI}(750)}$ заменяется на противоположное $I_{\text{CuI}(511)} > I_{\text{ArI}(750)}$. Аппроксимация экспериментальной зависимости на рис. 2 с достоверностью 0.997 приводит к экспоненте:

$$\alpha = \frac{I_{\text{CuI}(511)}}{I_{\text{ArI}(750)}} = 0.64 \exp\left(\frac{I}{2.71}\right) - 0.72.$$

Результаты детального изучения спектров испускания содержатся на рис. 3, где изображены зависимости от тока разряда и давления аргона величин $I_{\text{ArI}(750)}$ и $I_{\text{CuI}(511)}$. Из рис. 3 видно, что эти зависимости имеют разный характер. Если все величины $I_{\text{ArI}(750)}$ на рис. 3, а возрастают с уменьшением производных, стремясь к насыщению, то

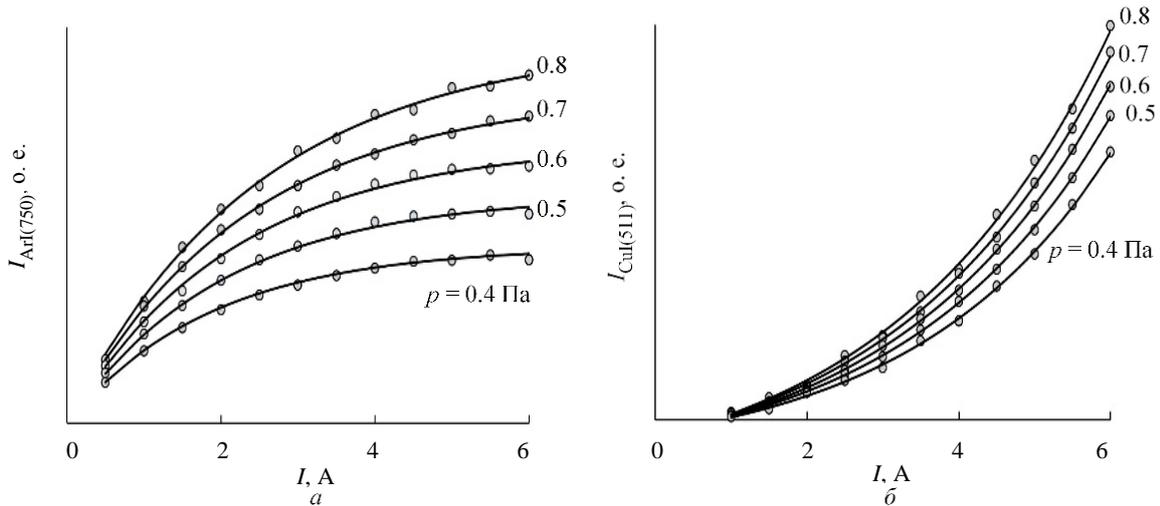


Рис. 3. Влияние тока разряда и давления аргона на интенсивность линий ArI (750) (а) и CuI (511) (б) в спектрах испускания разряда магнетрона с медной мишенью (точки – эксперимент; линии – аппроксимация)
Fig. 3. Effect of discharge current and argon pressure on the intensity of ArI (750) (a) and CuI (511) (b) lines in the emission spectrums of a magnetron discharge with a copper target (points – experiment; lines – approximation)

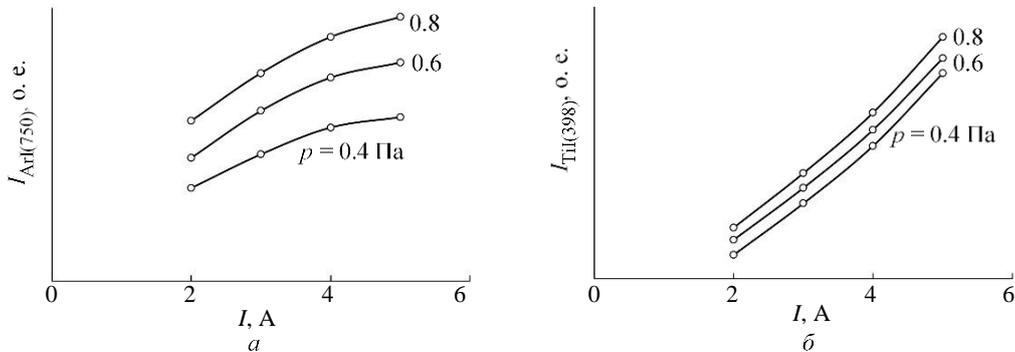


Рис. 4. Влияние тока разряда и давления аргона на интенсивность линий ArI (750) (а) и TiI (398) (б) в спектрах испускания разряда магнетрона с титановой мишенью
Fig. 4. Effect of discharge current and argon pressure on the intensity of ArI (750) (a) and TiI (398) (b) lines in the discharge emission spectrums of a magnetron with titanium target

величины $I_{\text{CuI}(511)}$ на рис. 3, б при всех давлениях демонстрируют увеличение производных.

Прямое влияние увеличения тока разряда приводит к пропорциональному увеличению потока расплывших атомов металла, что в соответствии с выражением (1) должно повлечь за собой аналогичное увеличение концентрации возбужденных атомов. Наблюдаемый нелинейный рост интенсивности соответствующих линий в спектрах связан, скорее всего, с реакцией обмена возбужденными состояниями (5). Очевидно, что она не только служит причиной ускоренного возрастания величины $I_{\text{CuI}(511)}$ на рис. 3, б, но и обеспечивает замедление роста величины $I_{\text{ArI}(750)}$ на рис. 3, а.

Сплошные линии на рис. 3 отражают результаты аппроксимации экспериментальных зависимостей с достоверностью 0.996. Аппроксимирующие кривые – это функции тока разряда I и давления аргона p :

$$I_{\text{ArI}(750)} = (32.4p + 47.1) \left(1 - \exp \frac{I}{0.15p + 1.6} \right); \quad (6)$$

$$I_{\text{CuI}(511)} = (13.2p + 68.5) \exp \left(-\frac{I}{0.06p + 2.5} \right) - (16.5p + 56.2). \quad (7)$$

Как видно из рис. 3, при увеличении давления интенсивность линий $I_{\text{ArI}(750)}$ и $I_{\text{CuI}(511)}$ увеличивается. Результат очевиден, поскольку увеличение давления влечет за собой увеличение сечения возбуждения атомных частиц [17]. Этот эффект отражается в (6) и (7) в виде зависимостей от давления параметров экспонент в форме полиномов первого порядка.

Аналогичные результаты получены при исследовании разряда магнетронов с мишенями из титана и молибдена. Так, на рис. 4 и 5 изображены полученные зависимости от тока разряда и

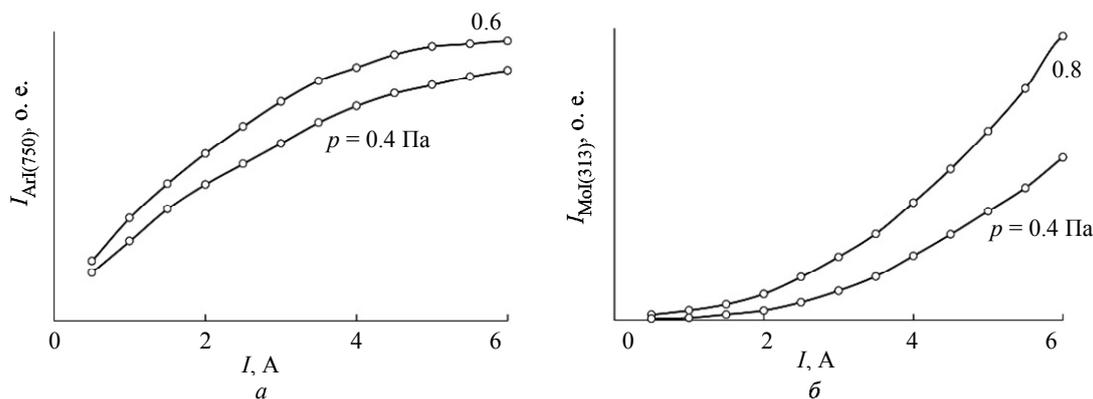


Рис. 5. Влияние тока разряда и давления аргона на интенсивность линий ArI (750) (а) и MoI (313) (б) в спектрах испускания разряда магнетрона с молибденовой мишенью

Fig. 5. Effect of discharge current and argon pressure on the intensity of ArI (750) (a) and MoI (313) (b) lines in the discharge emission spectrums of a magnetron with molybdenum target

давления аргона интенсивностей линий в спектрах, соответствующих возбужденным атомам аргона и металлов. Качественно кривые на рис. 4 и 5 аналогичны соответствующим кривым на рис. 3: все величины $I_{\text{ArI}(750)}$ на рис. 4, а и 5, а возрастают с уменьшением производных, стремясь к насыщению, а интенсивности линий металлов на рис. 4, б и 5, б при всех давлениях демонстрируют увеличение производных. Причем увеличение давления во всех случаях влечет за собой увеличение интенсивности линий $I_{\text{ArI}(750)}$, $I_{\text{TiI}(398)}$ и $I_{\text{MoI}(313)}$.

В результате выполненных исследований установлены основные особенности разряда постоянного тока в диапазоне 0.5...6.0 А в среде аргона магнетрона с металлической мишенью, которые проявляются в спектрах испускания. Эти

особенности были обнаружены при детальном исследовании магнетрона с медной мишенью и подтверждены для магнетронов с титановой и молибденовой мишенями. Так, при малом токе интенсивность линии аргона значительно больше интенсивности линии металла. При увеличении тока соотношение этих интенсивностей изменяется на противоположное. Характерно, что интенсивности линий аргона при увеличении тока разряда возрастают с уменьшением производных, стремясь к насыщению, в то время как интенсивности линий металлов при увеличении давления возрастают, демонстрируя увеличение производных. Все изученные экспериментальные зависимости от тока разряда с достоверностью 0.996 аппроксимированы экспоненциальными функциями, параметры которых зависят от давления аргона в виде полиномов первого порядка.

Список литературы

1. Archer M., McCrindle R. I., Rohwer E. R. Analysis of cobalt, tantalum, titanium, vanadium and chromium in tungsten carbide by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry // J. Analyt. Atomic Spectrom. 2003. Vol. 18. P. 1493–1496. doi: 10.1039/b310482f.
2. Dzierzega K., Pokrzywka B., Pellerin S. Investigations of the cathode region of an argon arc plasma by degenerate four-wave mixing laser spectroscopy and optical emission spectroscopy // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. Vol. 37. P. 1742–1749. doi: 10.1088/0022-3727/37/13/004.
3. Seo D., Chung T. Observation of the transition of operating regions in a low-pressure inductively coupled oxygen plasma by Langmuir probe measurement and optical emission spectroscopy // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. Vol. 34. P. 2854–2861. doi: 10.1088/0022-3727/34/18/320.
4. Lounsbury J. B. Effects of Added O₂ upon Argon Emission from an rf Discharge // J. Vac. Sci. Technol. 1969. Vol. 6. P. 838–842. doi: 10.1116/1.1492717.
5. Giacomo A. D., Shakhmatov V. A., Pascale O. D. Optical emission spectroscopy and modeling of plasma produced by laser ablation of titanium oxides // Spectroch. Acta Part B: Atomic Spectrosc. 2001. Vol. 56. P. 753–776. doi: 10.1016/s0584-8547(01)00224-5.
6. Optical emission spectroscopy on pulsed-DC plasmas used for TiN depositions / K. S. Mogensen, S. S. Eskildsen, C. Mathiasen, J. Bøttiger // Surf. Coat. Technol. 1998. Vol. 102. P. 41–49. doi: 10.1016/s0257-8972(97)00529-x.
7. Optical diagnostics of d.c. and r.f. argon magnetron discharges / M. F. Dony, A. Ricard, J. P. Dauchot, M. Hecq, M. Wautelet // Surf. Coat. Technol. 1995. Vol. 74–75. P. 479–484. doi: 10.1016/0257-8972(95)08250-6.

8. Oxygen flow rate effect on copper oxide thin films deposited by radio frequency magnetron sputtering / R. Tadjine, A. Houimi, M. M. Alim, N. Oudini // *Thin Solid Films*. 2022. Vol. 741. P. 139013. doi: 10.1016/j.tsf.2021.139013.
9. Single-shot spatial-resolved optical emission spectroscopy of argon and titanium species within the spoke / M. Šlapanská, M. Kroker, J. Hnilica, P. Klein, P. Vašina // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2022. Vol. 55. P. 035205. doi: 10.1088/1361-6463/ac2cae.
10. Diagnosing asymmetric bipolar HiPIMS discharges using laser Thomson scattering / M. A. Law, F. L. Estrin, M. D. Bowden, J. W. Bradley // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2021. Vol. 30. P. 105019. doi: 10.1088/1361-6595/ac2be4.
11. Correlation between plasma parameters and structure of thin TiO₂ films deposited by conventional and pulsed magnetron sputtering methods / M. Makówka, A. Sobczyk-Guzenda, W. Pawlak, B. Wendler, M. Gazicki-Lipman, H. Szymanowski // *Appl. Sur. Sci.* 2022. Vol. 578. P. 151808. doi: 10.1016/j.apsusc.2021.151808.
12. Vargas S., Galeano-Osorio D. S., Castano C. E. Controlling preferential growth of chromium – Nitrogen R-HiPIMS and R-DCMS films by substrate magnetic biasing // *Appl. Sur. Sci.* 2021. Vol. 569. P. 151113. doi: 10.1016/j.apsusc.2021.151113.
13. Aita C. R., Marhic M. E. Argon-oxygen interaction in RF sputtering glow discharges // *J. Appl. Phys.* 1981. Vol. 52. P. 6584–6587. doi: 10.1063/1.328610.
14. Oxygen active species in an Ar-O₂ magnetron discharge for titanium oxide deposition / V. Vancoppenolle, P. Y. Jouan, A. Ricard, M. Wautelet, J.-P. Dauchot, M. Hecq // *Appl. Sur. Sci.* 2003. Vol. 205. P. 249–255. doi: 10.1016/s0169-4332(02)01085-1.
15. Time-resolved optical emission spectroscopy of pulsed DC magnetron sputtering plasmas / J. Lopez, W. Zhu, A. Freilich, A. Belkind, K. Becker // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. Vol. 38. P. 1769–1780. doi: 10.1088/0022-3727/38/11/018.
16. Hopwood J., Qian F. Mechanisms for highly ionized magnetron sputtering // *J. Appl. Phys.* 1995. Vol. 78. P. 758–765. doi: 10.1063/1.360334.
17. Raizer Yu. P. *Gas Discharge Physics* // Springer. Berlin. New York. 1997.

Информация об авторах

Иванов Никита Максимович – студент гр. 7207 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: nikitosiv@list.ru

Шаповалов Виктор Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры физической электроники и технологии СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: vishapovalov@mail.ru

References

1. Archer M., McCrindle R. I., Rohwer E. R. Analysis of cobalt, tantalum, titanium, vanadium and chromium in tungsten carbide by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry // *J. Analyt. Atomic Spectrom.* 2003. Vol. 18. P. 1493–1496. doi: 10.1039/b310482f.
2. Dzierzega K., Pokrzywka B., Pellerin S. Investigations of the cathode region of an argon arc plasma by degenerate four-wave mixing laser spectroscopy and optical emission spectroscopy // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2004. Vol. 37. P. 1742–1749. doi: 10.1088/0022-3727/37/13/004.
3. Seo D., Chung T. Observation of the transition of operating regions in a low-pressure inductively coupled oxygen plasma by Langmuir probe measurement and optical emission spectroscopy // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2001. Vol. 34. P. 2854–2861. doi: 10.1088/0022-3727/34/18/320.
4. Lounsbury J. B. Effects of Added O₂ upon Argon Emission from an rf Discharge // *J. Vac. Sci. Technol.* 1969. Vol. 6. P. 838–842. doi: 10.1116/1.1492717.
5. Giacomo A. D., Shakhmatov V. A., Pascale O. D. Optical emission spectroscopy and modeling of plasma produced by laser ablation of titanium oxides // *Spectroch. Acta Part B: Atomic Spectrosc.* 2001. Vol. 56. P. 753–776. doi: 10.1016/s0584-8547(01)00224-5.
6. Optical emission spectroscopy on pulsed-DC plasmas used for TiN depositions / K. S. Mogensen, S. S. Eskildsen, C. Mathiasen, J. Bøttiger // *Surf. Coat. Technol.* 1998. Vol. 102. P. 41–49. doi: 10.1016/s0257-8972(97)00529-x.
7. Optical diagnostics of d.c. and r.f. argon magnetron discharges / M. F. Dony, A. Ricard, J. P. Dauchot, M. Hecq, M. Wautelet // *Surf. Coat. Technol.* 1995. Vol. 74–75. P. 479–484. doi: 10.1016/0257-8972(95)08250-6.
8. Oxygen flow rate effect on copper oxide thin films deposited by radio frequency magnetron sputtering / R. Tadjine, A. Houimi, M. M. Alim, N. Oudini // *Thin Solid Films*. 2022. Vol. 741. P. 139013. doi: 10.1016/j.tsf.2021.139013.
9. Single-shot spatial-resolved optical emission spectroscopy of argon and titanium species within the spoke / M. Šlapanská, M. Kroker, J. Hnilica, P. Klein, P. Vašina // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2022. Vol. 55. P. 035205. doi: 10.1088/1361-6463/ac2cae.
10. Diagnosing asymmetric bipolar HiPIMS discharges using laser Thomson scattering / M. A. Law, F. L. Estrin, M. D. Bowden, J. W. Bradley // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2021. Vol. 30. P. 105019. doi: 10.1088/1361-6595/ac2be4.
11. Correlation between plasma parameters and structure of thin TiO₂ films deposited by conventional

and pulsed magnetron sputtering methods / M. Makówka, A. Sobczyk-Guzenda, W. Pawlak, B. Wendler, M. Gazicki-Lipman, H. Szymanowski // Appl. Sur. Sci. 2022. Vol. 578. P. 151808. doi: 10.1016/j.apsusc.2021.151808.

12. Vargas S., Galeano-Osorio D. S., Castano C. E. Controlling preferential growth of chromium – Nitrogen R-HiPIMS and R-DCMS films by substrate magnetic biasing // Appl. Sur. Sci. 2021. Vol. 569. P. 151113. doi: 10.1016/j.apsusc.2021.151113.

13. Aita C. R., Marhic M. E. Argon-oxygen interaction in RF sputtering glow discharges // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. P. 6584–6587. doi: 10.1063/1.328610.

14. Oxygen active species in an ArO₂ magnetron discharge for titanium oxide deposition / V. Vancoppenolle,

P. Y. Jouan, A. Ricard, M. Wautelet, J.-P. Dauchot, M. Hecq // Appl. Sur. Sci. 2003. Vol. 205. P. 249–255. doi: 10.1016/s0169-4332(02)01085-1.

15. Time-resolved optical emission spectroscopy of pulsed DC magnetron sputtering plasmas / J. Lopez, W. Zhu, A. Freilich, A. Belkind, K. Becker // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. Vol. 38. P. 1769–1780. doi: 10.1088/0022-3727/38/11/018.

16. Hopwood J., Qian F. Mechanisms for highly ionized magnetron sputtering // J. Appl. Phys. 1995. Vol. 78. P. 758–765. doi: 10.1063/1.360334.

17. Raizer Yu. P. Gas Discharge Physics // Springer. Berlin. New York. 1997.

Information about the authors

Nikita M. Ivanov – student gr. 7207 of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: nikitosiv@list.ru

Viktor I. Shapovalov – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Physical Electronics and Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vishapovalov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.08.2022; принята к публикации после рецензирования 13.09.2022; опубликована онлайн 25.11.2022.

Submitted 17.08.2022; accepted 13.09.2022; published online 25.11.2022.