

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК В ВАКУУМНЫХ КАМЕРАХ МЕТОДОМ HiPIMS

В. Л. ТКАЛИЧ¹, Н. С. ПОТЕМИНА¹, А. Г. КОРОБЕЙНИКОВ^{1,2}, О. И. ПИРОЖНИКОВА¹

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru

²Санкт-Петербургский филиал

Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН,
199034, Санкт-Петербург, Россия

Обсуждается проблема создания отечественной высоконадежной элементной базы микросистемной техники, в которой широко применяются тонкие пленки при производстве микроэлектромеханических систем. Рассматривается метод HiPIMS, используемый для получения тонких пленок в вакуумных камерах при газовом разряде. Представлены разработанные стенд для анализа газового разряда и зонд, обеспечивающий получение данных для построения вольт-амперных характеристик этого разряда. В среде MatLab разработано программное обеспечение, позволяющее корректно обрабатывать полученные вольт-амперные характеристики. Установлены параметры, влияющие на режим магнетронного напыления (напряжение, частота и скважность импульса), которые позволяют управлять процессом напыления тонких пленок.

Ключевые слова: напыление тонких пленок, магнетронное распыление, метод HiPIMS, вольт-амперная характеристика, концентрация носителей заряда, напряжение разряда, скважность, частота импульсов

Повышение эффективности процесса создания тонких пленок при производстве отечественных конкурентоспособных микроэлектромеханических систем и устройств микросистемной техники является в настоящее время актуальной проблемой.

Технология напыления тонких пленок при возникающем в вакуумной камере газовом разряде носит название магнетронного распыления [1—5]. Одним из перспективных методов ионизации газа в вакуумной камере является метод HiPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering) [6], при использовании которого ионизация газа обеспечивается под действием на него магнитных импульсов высокой мощности. Такая технология позволяет с помощью высокомоментных импульсов поддерживать состояние аномального тлеющего разряда в вакуумной камере. Это дает возможность получать тонкие пленки с улучшенными физико-химическими свойствами [2].

Интерес к методу ионизации газа, используемому в технологии HiPIMS, обусловлен возможностью его оптимизации и повышения эффективности. Поэтому именно данный метод является объектом анализа в настоящей статье, предмет анализа — зависимость параметров носителей заряда, образующихся при газовом разряде, от характеристик используемого источника питания. Для решения этой задачи был выполнен анализ газового разряда при импульсах высокой мощности в вакуумной камере методом HiPIMS.

В ходе аналитического обзора научно-технической и патентной литературы по данной тематике выявлены особенности газового разряда, свойственные разным методам магнетронного распыления и, в частности, методу HiPIMS. Установлено, что оптимальным инструментом при диагностике газового разряда, а именно параметров носителей заряда, является зонд, помещенный в вакуумную камеру (рис. 1).

Для проведения экспериментальных исследований авторами настоящей статьи был спроектирован и создан стенд на базе универсальной вакуумной установки (УВН-71) [2], обеспечивающей условия для требуемого газового разряда.

Анализ газового разряда (носителей заряженных частиц) осуществлялся с помощью разработанного зонда, выполненного из тугоплавкого вольфрама. При изоляции вольфрамовой части зонда использовался фторопласт.

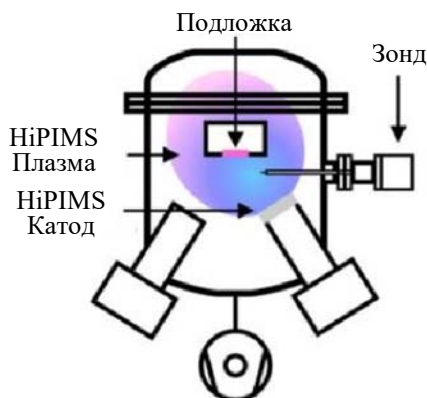


Рис. 1

В ходе проведения экспериментов на установке с зондом было получено шесть вольт-амперных характеристик (ВАХ). Измерения осуществлялись при давлении 0,066 Па, для двух значений напряжения разряда (600 и 800 В, рис. 2—4), при двух значениях частот импульса (0,2 и 0,6 кГц, рис. 5) и двух значений скважности импульса (50 и 75 мкс, рис. 6). При этом напряжение, подаваемое на зонд, изменялось в диапазоне от -40 до $+40$ В.

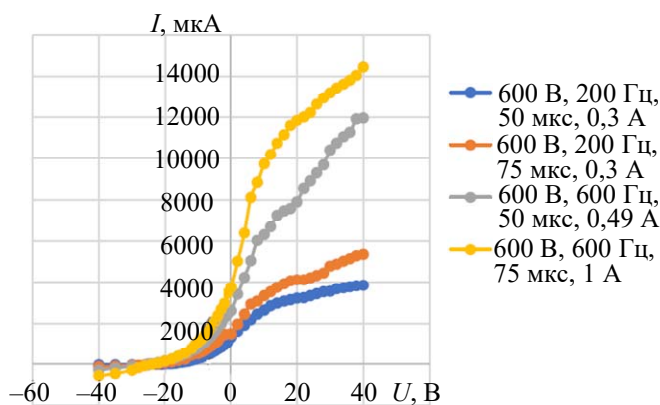


Рис. 2

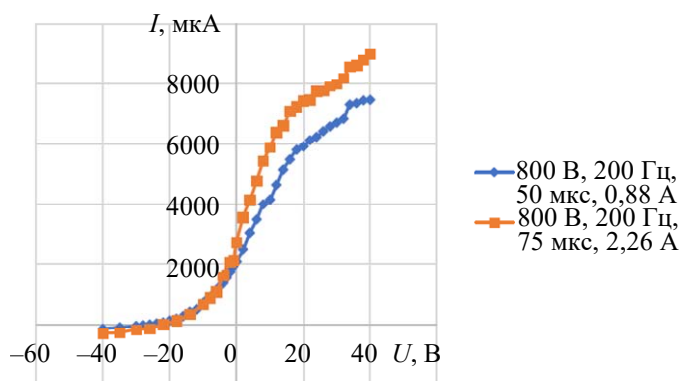


Рис. 3

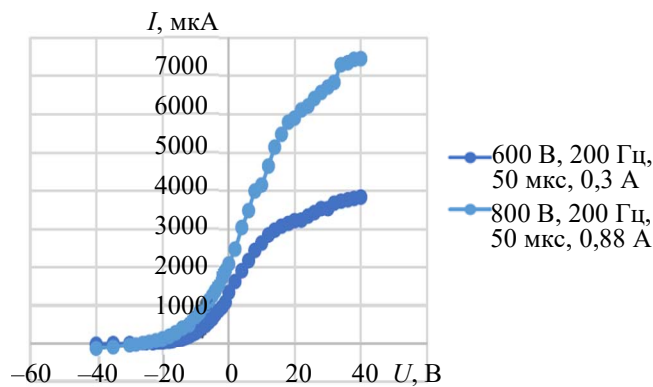


Рис. 4

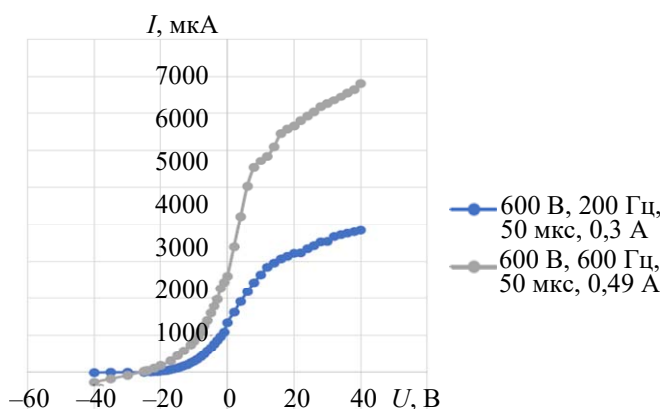


Рис. 5

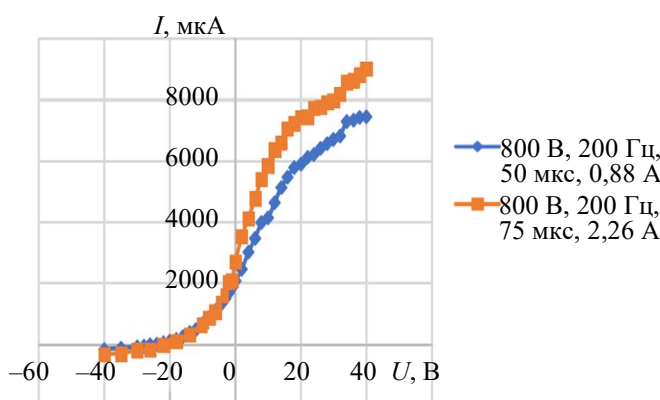


Рис. 6

С использованием программной среды MatLab [7—9] авторами было разработано программное обеспечение (ПО), позволяющее на базе экспериментальных данных, полученных посредством зондового метода, осуществлять построение и обработку ВАХ газового разряда. Предусмотрено введение дополнительного функционала в виде функции распределения электронов по энергии и вариантов упрощенного ввода данных. Входной массив данных в текстовом формате преобразуется средствами MatLab в формат, который используется для построения ВАХ зонда и вывода по оси абсцисс плавающего потенциала. Плавающий потенциал определяется следующим образом — с помощью поля While loop сканируется входной массив данных для нахождения двух точек, ближайших к нулевому значению тока, что позволяет определить среднее арифметическое значение напряжения с погрешностью не более 2 %.

Для определения потенциала плазмы и температуры электронов с помощью разработанного ПО находится первая производная ВАХ. По первому максимуму этой производной вычисляется величина потенциала плазмы, а температура электронов определяется на участке графика первой производной ВАХ зонда (в диапазоне от плавающего потенциала до

потенциала плазмы) путем его аппроксимации и вычисления тангенса угла наклона полученной прямой к оси абсцисс.

Для выполнения анализа экспериментальных результатов были сформированы таблицы, отображающие исходные данные (табл. 1) и данные, полученные в ходе экспериментов

Таблица 1

Параметр	Номер эксперимента					
	1	2	3	4	5	6
Напряжение разряда, В	600	600	600	600	800	800
Частота разряда, Гц	200	200	600	600	200	200
Скважность импульса, мкс	50	75	50	75	50	75
Ток разряда, А	0,3	0,3	0,49	1	0,88	2,26

Таблица 2

Параметр	Номер эксперимента					
	1	2	3	4	5	6
Потенциал плазмы, В	0	4	4	6	4	0
Плавающий потенциал, В	-24	-25	-27,5	-25	-27	-24
Температура электронов, эВ	6,314	10,913	8,73	9,34	8,07	4,42
Концентрация электронов $\times 10^9$, см ⁻³	4,18	5,82	11,21	20,8	8,37	10,2
Концентрация ионов $\times 10^9$, см ⁻³	7,92	48,2	112,1	238	65,4	189

Как видно из рис. 4, увеличение напряжения разряда ведет также к росту тока разряда. Это связано с тем, что при росте напряжения увеличивается и энергия электронов. Установлено, что температура и концентрация электронов растут с увеличением значения напряжения. Это обуславливается большим значением энергии электронов, что ведет к увеличению количества процессов, связанных с ионизацией атомов газа при разряде. Также из рис. 5 следует, что увеличение тока зонда возможно и при повышении частоты импульсов. Это объясняется тем, что в единицу времени возможно большее количество процессов, связанных с ионизацией атомов газа при разряде. Это увеличивает концентрацию электронов и ионов, а следовательно, и потенциал плазмы.

При изменении длительности импульсов наблюдается также рост потенциала и энергии электронов (см. рис. 6); кроме того, что при увеличении времени скважности наблюдается повышение концентрации как электронов, так и ионов в локальной области зонда.

Итак, эксперименты, проведенные с помощью созданного стенда позволили получить серию ВАХ газового разряда при различных параметрах импульсного сигнала высокой мощности. При выполнении анализа ВАХ установлено, что для достижения режима качественного магнетронного распыления по технологии HiPIMS можно использовать либо изменения напряжения импульса, либо изменение его частоты и скважности. При увеличении любого из этих параметров удастся достичь повышения тока зонда, что, в свою очередь, ведет к увеличению концентрации заряженных частиц, участвующих в процессе формирования тонких пленок. Это позволяет управлять самим процессом напыления пленок в газовом разряде магнетронным методом, что подтверждено экспериментальными работами и патентами [10—16].

Таким образом, из вышеизложенного следует, что применение рассмотренного в работе метода HiPIMS делает процесс напыления пленок в газовом разряде более качественным и эффективным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антоненко С. В. Технология тонких пленок. М.: МИФИ, 2008. 104 с.
2. Берлин Е., Двинин С., Сейдман Л. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок. М.: Техносфера, 2007.
3. Ануфриев Л. П. Технология интегральной электроники. Минск: Интегралполиграф, 2011. 379 с.

4. Шупенев А. Е. Анализ неразрушающих методов измерения и контроля толщины тонких пленок. // Изв. вузов. Машиностроение. 2019. № 4 (709). С. 18—27.
5. Чу Чонг Шы. Компьютерное моделирование процесса роста тонких пленок при термическом вакуумном напылении // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2016. С. 22—31.
6. Ehasarian A. P. Fundamentals and applications of HIPIMS // Plasma Surface Engineering Research and its Practical Applications / Ronghua Wei, ed. Trivandrum, 2008. P. 35—87.
7. Гришенцев А. Ю., Коробейников А. Г. Разработка модели решения обратной задачи вертикального зондирования ионосферы // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 2 (72). С. 109—113.
8. Коробейников А. Г., Кутузов И. М., Колесников П. Ю. Анализ методов обфускации // Кибернетика и программирование. 2012. № 1. С. 31—37.
9. Калинин М. Е., Коробейников А. Г., Коновалов Н. Ю., Пирожникова О. И., Ткалич В. Л., Шмаков Н. А. Влияние электростатических воздействий и температурного фактора на деформирование чувствительного элемента микромеханических приборов // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 1. С. 78—80.
10. Пат. 2287837 (С1) РФ, МПК7 G01R 33/038. Датчик магнитометра / В. М. Мусалимов, В. Л. Ткалич, А. Г. Коробейников, М. С. Петрищев, П. А. Сергушин. Оpubл. 20.11.2006.
11. Пат. 2309419 (С2) РФ, МПК7 G01R 33/24. Устройство для измерения параметров магнитного поля / В. М. Мусалимов, В. Л. Ткалич, А. Г. Коробейников, М. С. Петрищев. Оpubл. 27.10.2007.
12. Пат. 144305 (U1) РФ, МПК7 H01H 1/66. Магнитоуправляемый контакт / В. Л. Ткалич, А. Г. Коробейников, Р. Я. Лабковская, О. И. Пирожникова. Оpubл. 20.08.2014.
13. Пат. 136920 (U1) РФ, МПК7 H01H 1/66. Магнитоуправляемый контакт / В. Л. Ткалич, А. Г. Коробейников, Р. Я. Лабковская, О. И. Пирожникова. Оpubл. 20.01.2014.
14. Пат. 166022 (U1) РФ, МПК7 H01H 1/66, H01H 37/52, G08B 17/06. Мембранный термобиметаллический магнитоуправляемый контакт / В. Л. Ткалич, Р. Я. Лабковская, О. И. Пирожникова, А. С. Козлов. Оpubл. 10.11.2016.
15. Пат. 176399 (U1) РФ, МПК7 G01R 33/038. Датчик магнитометра / В. Л. Ткалич, Р. Я. Лабковская, О. И. Пирожникова, А. С. Козлов. Оpubл. 17.01.2018.
16. Пат. 192957 (U1) РФ, МПК7 G01L 9/04, B82Y 40/00. Чувствительный элемент прецизионного датчика давления / В. Л. Ткалич, Р. Я. Лабковская, О. И. Пирожникова, А. С. Козлов, М. Е. Калинин. Оpubл. 17.01.2018.

Сведения об авторах

Вера Леонидовна Ткалич

— д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий;
E-mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru

Наталья Станиславовна Потемина

— Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; ассистент

Анатолий Григорьевич Коробейников

— д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН им. Н. В. Пушкова; зам. директора по науке;
E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru

Ольга Игоревна Пирожникова

— канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; E-mail: cheesecake@mail.ru

Поступила в редакцию
24.11.2020 г.

Ссылка для цитирования: Ткалич В. Л., Потемина Н. С., Коробейников А. Г., Пирожникова О. И. Анализ процесса напыления тонких пленок в вакуумных камерах методом HiPIMS // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 3. С. 219—225.

ANALYSIS OF THE PROCESS OF THIN FILM DEPOSITION IN VACUUM CHAMBERS BY HiPIMS METHOD

V. L. Tkalic¹, N. S. Potemina¹, A. G. Korobeynikov^{1,2}, O. I. Pirozhnikova¹

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: vera_leonidovna_tkalic@mail.ru

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the RAS,
St. Petersburg Branch, 199034, St. Petersburg, Russia

The problem of developing a domestic reliable element base of micro-system technology, in which thin films are widely used in the creation of microelectromechanical systems, is considered. At present, magnetron sputtering methods are actively used to obtain thin films in vacuum chambers in a gas discharge. Such methods include the HiPIMS method. A stand is created for analyzing a gas discharge and a probe, which allows obtaining data for plotting the current-voltage characteristics of this discharge. A software developed in the MatLab environment made it possible to correctly process the obtained volt-ampere characteristics. Parameters influencing the mode of magnetron spraying (changes in voltage, pulse, pulse frequency and on-off time ratio) are established to make it possible to control over the process of thin films spraying and increase the percentage of yield of suitable product samples.

Keywords: thin films deposition, magnetron sputtering, HiPIMS method, CVC, concentration of charge carriers, discharge voltage, duty cycle, pulse frequency

REFERENCES

1. Antonenko S.V. *Tekhnologiya tonkikh plenok* (Thin Film Technology) Moscow, 2008, 104 p. (in Russ.)
2. Berlin E., Dvinin S., Seidman L. *Vakuumnaya tekhnologiya i oborudovaniye dlya nanoseniya i travleniya tonkikh plenok* (Vacuum Technology and Equipment for the Deposition and Etching of thin Films), Moscow, 2007. (in Russ.)
3. Anufriyev L.P. *Tekhnologiya integral'noy elektroniki* (Integrated Electronics Technology), Minsk, 2011, 379 p. (in Russ.)
4. Shupenev A.E. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2019, no. 4(709), pp. 18–27. (in Russ.)
5. Chu Trong Su. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2016, no. 6, pp. 22–31. (in Russ.)
6. Ehasarian A.P. *Plasma Surface Engineering Research and its Practical Applications*, Trivandrum, Research Signpost, 2008, pp. 35–87. ISBN 978-81-308-0257-2.
7. Grishentsev A.Yu., Korobeynikov A.G. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 2(72), pp. 109–113. (in Russ.)
8. Korobeynikov A.G., Kutuzov I.M., Kolesnikov P.Yu. *Kibernetika i programirovaniye*, 2012, no. 1, pp. 31–37. (in Russ.)
9. Kalinkina M.E., Korobeynikov A.G., Konovalov N.Yu., Pirozhnikova O.I., Tkalic V.L., Shmakov N.A. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2019, no. 1, pp. 78–80. (in Russ.)
10. Patent RU 2287837(C1), G01R 33/038, *Datchik magnitometra* (Magnetometer Sensor), V.M. Musalimov, V.L. Tkalic, A.G. Korobeynikov, M.S. Petrishchev, P.A. Sergushin, Patent application no. 2005111814/28, Priority 20.04.2005, Published 20.11.2006. (in Russ.)
11. Patent RU 2309419(C2), G01R 33/24, *Ustroystvo dlya izmereniya parametrov magnitnogo polya* (Device for Measuring Magnetic Field Parameters), V.M. Musalimov, V.L. Tkalic, A.G. Korobeynikov, M.S. Petrishchev. Patent application no. 2005130568/28, Priority 03.10.2005, Published 27.10.2007. (in Russ.)
12. Patent RU 144305(U1), H01H 1/66, *Magnitoupravlyayemyy kontakt* (Magnetically Controlled Contact), V.L. Tkalic, A.G. Korobeynikov, R.Ya. Labkovskaya, O.I. Pirozhnikova, Patent application no. 2014108108/07, Priority 03.03.2014, Published 20.08.2014. (in Russ.)
13. Patent RU 136920, H 01 H 1/66, *Magnitoupravlyaemyy kontakt* (Magnetically Operated Contact), Tkalic V.L., Korobeynikov A.G., Labkovskaya R.Ya., Pirozhnikova O.I., Priority 08.08.2013, Published 20.01.2014. (in Russ.)
14. Patent RU 166022 (U1), H01H 1/66, H01H 37/52, G08B 17/06. *Membrannyy termobimetallicheskiy magnitoupravlyayemyy kontakt* (Membrane Thermobimetallic Magnetically Controlled Contact), V.L. Tkalic, R.Ya. Labkovskaya, O.I. Pirozhnikova, A.S. Kozlov, Patent application no. 2016115033/07, Priority 18.04.2016, Published 10.11.2016. (in Russ.)
15. Patent RU 176399(U1), G01R 33/038, *Datchik magnitometra* (Magnetometer Sensor), V.L. Tkalic, R.Ya. Labkovskaya, O.I. Pirozhnikova, A.S. Kozlov, Patent application no. 2017120116, Priority 07.06.2017, Published 17.01.2018. (in Russ.)
16. Patent RU 192957(U1), G01L 9/04, B82Y 40/00, *Chuvstvitel'nyy element pretsizionnogo datchika davleniya* (Sensing Element of a Precision Pressure Sensor), V.L. Tkalic, R.Ya. Labkovskaya, O.I. Pirozhnikova, A.S. Kozlov, M.E. Kalinkina, Patent application no. 2017120116, Priority 07.06.2017, Published 17.01.2018. (in Russ.)

Data on authors

Vera L. Tkalic

— Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: vera_leonidovna_tkalic@mail.ru

- Natalia S. Potemina** — ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Assistant
- Anatoly G. Korobeynikov** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the RAS, St. Petersburg Branch; Deputy Director for Science; E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru
- Olga I. Pirozhnikova** — PhD; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: cheesecake@mail.ru

For citation: Tkalich V. L., Potemina N. S., Korobeynikov A. G., Pirozhnikova O. I. Analysis of the process of thin film deposition in vacuum chambers by HiPIMS method. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 3. P. 219—225 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-3-219-225