

## Дуальная магнетронная распылительная система с пакетно-импульсным модулированным биполярным напряжением питания

*В.О. Оскирко, В.А. Семенов, А.П. Павлов, А.Н.Захаров*  
*Томск, ИСЭ СО РАН, пр. Академический 2/3;*  
*E-mail: oskirkovo@gmail.com*

*Приведены результаты использования пакетно-импульсного биполярного напряжения питания применительно к дуальной магнетронной распылительной системе. Использование пакетных импульсных режимов дуального магнетронного распыления позволяет в пять раз увеличить плотность разрядного тока и в 20 раз плотность мощности на поверхности распыляемой мишени, в сравнении с традиционными режимами магнетронного распыления на постоянном и среднечастотном токе и обеспечивает более высокую концентрацию плазмы и плотность ионного тока насыщения. Концентрация плазмы в процессе экспериментов достигала величины  $7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  на расстоянии 12 см от поверхности мишени.*

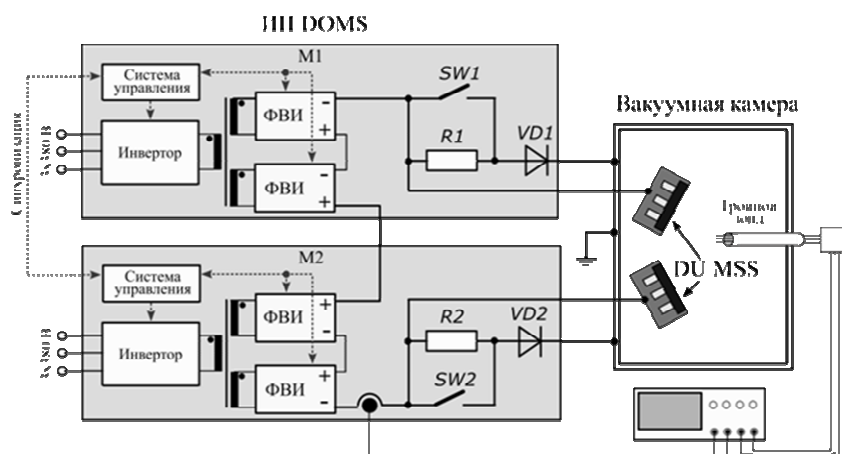
***Dual magnetron sputtering system with packet pulse modulated bipolar supply voltage. V.O.Oskirko, V.A.Semenov, A.P.Pavlov, A.N.Zakharov. The results of the use of packet-pulse bipolar supply voltage applied to the dual magnetron sputtering system are presented. The use of packet pulse modes of dual magnetron sputtering allows to increase the discharge current density five times and the power density 20 times on the surface of the sputtered target in comparison with the traditional modes DC and MF magnetron sputtering. This provides a higher plasma concentration and ionic saturation current density. The plasma concentration in the experiments reached  $7 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  at a distance of 12 cm from the target surface.***

К настоящему времени технологии магнетронного распыления заняли лидирующие позиции в производстве микроэлектроники, средств записи и дисплеев. С помощью магнетронных распылительных систем (МРС) формируются защитные, износостойкие, декоративные и другие функциональные покрытия на различных подложках. Особенно ярко преимущества магнетронного распыления проявляются при нанесении металлических плёнок или проводящих оксидов. Однако при реактивном напылении диэлектрических плёнок возникают проблемы связанные с процессами дугообразования на мишени и «исчезновением» анода в результате образования на его поверхности непроводящего покрытия. Часто возникающие дуги усложняют управление технологическим процессом и ухудшают качество напыляемых тонких плёнок. Горение дуги вызывает выброс из горящего катодного пятна материала мишени в виде микрочастиц или микрокапель оседающих на подложке и образование дефектов в растущей плёнке. Стабильный во времени бездуговой режим реактивного магнетронного разряда позволит получать диэлектрические покрытия высокого качества в промышленном масштабе.

В последние годы были разработаны новые методы магнетронного распыления, позволяющие получить высокие значения концентрации плазмы и степени ионизации распылённого материала. Это метод сильноточного импульсного магнетронного распыления (High Power Impulse Magnetron Sputtering – HIPIMS) [1,2], а также метод модулированного магнетронного распыления импульсами высокой мощности (Modulated Pulse Power Magnetron Sputtering – MPPMS) [3,4]. В последние несколько лет появилась новая разновидность метода MPPMS, а именно пакетно-импульсное сильноточное магнетронное распыление, DOMS (Deep Oscillation Magnetron Sputtering) [5-7], которое обеспечивает высокую степень ионного воздействия на растущее покрытие. Новая технология все чаще применяется для решения задач, где важную роль играет степень ионизации распылённого материала и уровень ионного воздействия на растущее покрытие и имеет большие перспективы для получения диэлектрических покрытий, поскольку позволяет проводить процесс реактивного магнетронного распыления практически без дуг [8]. В работе [9] приводятся результаты реактивного напыления  $\text{TiO}_2$  методом DOMS практически без дуг. Процесс напыления

оставался стабильным в широком диапазоне разрядных токов и мощностей магнетронного разряда. Оксидные плёнки обладали хорошей кристаллическостью, даже без использования отрицательного смещения подложки и её нагрева. При увеличении разрядного тока до 200 А, оксидные плёнки формировались в фазе рутила, обладали большей твёрдостью и были более прозрачны в видимом диапазоне. Анализ научной литературы показывает перспективность метода DOMS для напыления диэлектрических покрытий, свойствами которых можно управлять изменением параметров импульсного питания МРС. В докладе приводятся результаты использования пакетно-импульсного биполярного напряжения питания применительно к дуальной магнетронной распылительной системе (ДМРС).

Для работы в пакетных импульсных режимах магнетронного распыления был изготовлен источник электропитания, структурная схема которого представлена на рис. 1. Источник позволяет формировать биполярные импульсы высокой мощности в виде пакетов (макроимпульсов). Каждый макроимпульс состоит из множества импульсов меньшей длительности (микроимпульсы). Источник позволяет регулировать амплитуды макро и микроимпульсов, а также их частоту и длительность. Диапазон регулирования амплитуды выходных импульсов напряжения – 100 ÷ 1500 В; максимальная величина импульсного выходного тока – 250 А; максимальная импульсная мощность – 375 кВт; частота повторения макроимпульсов – 1 ÷ 500 Гц; длительность макроимпульсов 100 ÷ 3000 мкс; частота повторения микроимпульсов – 5 ÷ 100 мкс; пауза между микроимпульсами – 5 мкс; максимальная средняя выходная мощность – 10 кВт; максимальный средний выходной ток – 7 А.



*Рис. 1. Схема источника пакетно-импульсного модулированного биполярного напряжения питания дуальной МРС.*

Источник оснащён модернизированной системой подавления электрических дуг, которая позволяет быстро детектировать дугу и рекуперировать остаточную энергию, запасаемую в выходном контуре. В результате, энергия дуги снижается до уровня 40-50 мДж, что позволяет избежать образования микрокапель в процессе напыления покрытия. Важной особенностью разработанного источника питания является возможность функционирования в нескольких режимах, отличающихся способом подключения к разрядной системе. ИП DOMS совместно с ДМРС способны работать в одиночном (далее SG DOMS) и дуальном (DU DOMS) режимах пакетного импульсного распыления. В режиме DU DOMS роль анода и катода попеременно выполняют мишени магнетронов ДМРС, в режиме SG DOMS анодом служат стенки вакуумной камеры. На выходе источника располагаются коммутационные цепи, соединяющие мишени-катоды ДМРС с вакуумной камерой. Каждая цепь включает в себя ключ (SW1, SW2), резистор (R1, R2) и диод (VD1, VD2). Ток протекает по цепи, когда на соответствующем выходе источника формируется положительная полярность напряжения. В одиночном режиме SW1 находится в замкнутом состоянии. В дуальном режиме ключи SW1 и SW2 разомкнуты. Резисторы R1 и R2 обладают большим сопротивлением (1 кОм), поэтому

практически весь разрядный ток протекает через мишень. В одиночном режиме замкнутые ключи шунтируют резисторы, поэтому разрядный ток может замыкаться на стенки камеры.

Диаметр мишеней ДМРС, изготовленных из алюминия, составлял 76 мм. Максимальная рабочая мощность распылительной системы в непрерывном режиме составляет 3 кВт.

На рис.2. приведены вольтамперные характеристики разряда при работе ДМРС с пакетно-импульсным модулированным биполярным напряжением питания (DU DOMS), в режиме постоянного тока (DCMS) и в режиме дуального среднечастотного распыления (DU MFMS). Давление аргона в вакуумной камере - 0,25 Па.

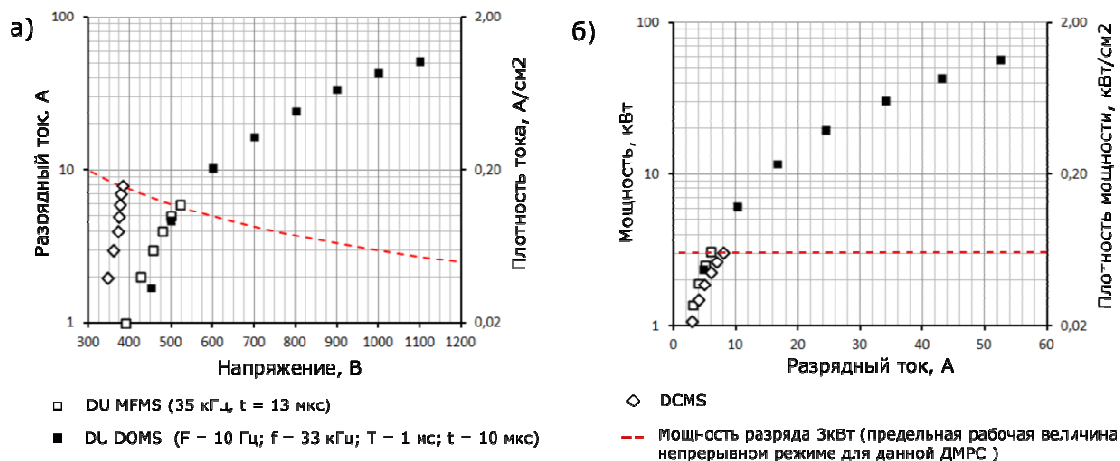


Рис. 2. ВАХ разряда и зависимость мощности разряда от разрядного тока для трёх режимов работы ДМРС.

На правой шкале отображены расчетные значения плотности тока и плотности мощности в кольцевой зоне распыления катодов. Пунктирными линиями обозначено предельное значение средней рабочей мощности (3 кВт) при работе в непрерывном режиме ДМРС. График на рис. 2.а показывает, что максимальные величины среднего разрядного тока в DC и DU режимах магнетронного распыления составляют 8 А и 6 А, соответственно. Благодаря уменьшению относительной длительности макроимпульса, в DU DOMS режиме средний разрядный ток в течение цуга увеличивался до 50 А. Максимальная плотность тока в рабочей области составила приблизительно 1 А/см<sup>2</sup>. График на рис.2.б показывает изменение мощности разряда при изменении разрядного тока. Мощность разряда во время макроимпульса достигает 60 кВт, а плотность мощности на мишени - 1.2 кВт/см<sup>2</sup>, что в 20 раз выше предельного значения для непрерывного режима (60 Вт/см<sup>2</sup>).

На рис.3. представлены зависимости концентрации плазмы и плотности ионного тока на зонд, измеренные на расстоянии 12 см от поверхности мишеней ДМРС в SG DOMS и DU DOMS режимах. Там же приведены параметры плазмы для DC и DU MFMS режимов магнетронного распыления при максимально допустимой величине средней мощности разряда – 3 кВт. Зависимости позволяют сравнить концентрацию плазмы и плотность ионного тока в различных режимах магнетронного распыления. При максимальной мощности разряда 56 кВт и плотности мощности на мишень 1,3 кВт/см<sup>2</sup> в режиме DU DOMS, концентрация плазмы составляет 7·10<sup>11</sup> см<sup>3</sup>, при этом плотность ионного тока насыщения на зонд -18 мА/см<sup>2</sup>. При одинаковой мощности разряда, плотность ионного тока насыщения в режиме DU DOMS приблизительно на 20 % выше, чем в SG DOMS режиме, в 4-5 раз выше значений, характерных для DU MFMS, и в 9 раз выше значений плотности ионного тока в режиме DCMS.

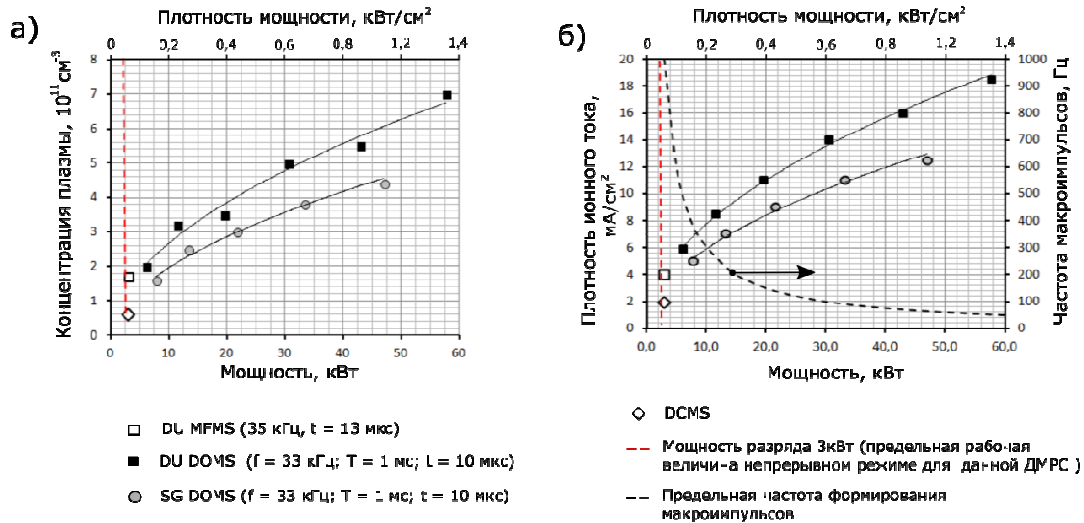


Рис. 3. Зависимости концентрации плазмы и плотности ионного тока для различных режимов работы ДМРС.

Экспериментально установлено, что дуальный режим пакетного импульсного сильноточного магнетронного распыления (DU DOMS) обеспечивает самую высокую концентрацию плазмы и плотность ионного тока насыщения в исследуемых режимах работы ДРМС и позволяет в 20 раз увеличить плотность мощности на мишени в сравнении с распылением на постоянном токе.

Работа выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований №18-42-703005.

#### Литература

1. A. Ehasarian, R. New, W.-D. Münz, L. Hultman, U. Helmersson, V. Kouznetsov, Influence of high power densities on the composition of pulsed magnetron plasmas, *Vacuum* 65 (2002) 147–154.
2. U. Helmersson, M. Lattemann, J. Bohlmark, A.P. Ehasarian, J.T. Gudmundsson, Ionized physical vapor deposition (IPVD): a review of technology and applications, *Thin Solid Films* 513 (2006) 1–24
3. J. Lin, J.J. Moore, W.D. Sproul, B. Mishra, Z. Wu, Modulated pulse power sputtered chromium coatings, *Thin Solid Films* 518 (2009) 1566–1570
4. J. Lin, J. Moore, W. Sproul, B. Mishra, J. Rees, Z. Wu, et al., Ion energy and mass distributions of the plasma during modulated pulse power magnetron sputtering, *Surf. Coat. Technol.* 203 (2009) 3676–3685
5. F. Ferreira, R. Serra, J. Oliveira, A. Cavaleiro, Effect of peak target power on the properties of Cr thin films sputtered by HiPIMS in deep oscillation magnetron sputtering (DOMS) mode, *Surf. Coat. Technol.* 258 (2014) 249–256
6. F. Ferreira, J. Oliveira, A. Cavaleiro, CrN thin films deposited by HiPIMS in DOMS mode, *Surf. Coat. Technol.* 291 (2016) 365–375
7. J. Lin, W.D. Sproul, Structure and properties of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings deposited using DCMS, PDCMS, and DOMS, *Surf. Coat. Technol.* 276 (2015) 70–76
8. F. Ferreira, R. Serra, A. Cavaleiro, J.C. Oliveira, Additional control of bombardment by deep oscillation magnetron sputtering: Effect on the microstructure and topography of Cr thin films, *Thin Solid Films* 619 (2016) 250–260
9. Jianliang Lin, Bo Wang, William D Sproul, Yixiang Ou and Isaac Dahan, Anatase and rutile TiO<sub>2</sub> films deposited by arc-free deep oscillation magnetron sputtering, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 46 (2013) 084008 (9pp).