ГЕЛИКОННЫЙ ИСТОЧНИК КАК ЭЛЕМЕНТ ГИБРИДНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СИСТЕМЫ В УСТАНОВКАХ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ С УПРАВЛЯЕМОЙ НАНОСТРУКТУРОЙ

HELICON SOURCE AS ELEMENT OF HYBRID PLASMA SYSTEM IN FACILITY FOR THIN-FILM COATING WITH CONTROLLED NANOSTRUCTURE

К.Вавилин¹, Е.Кралькина¹, П.Неклюдова¹, А.Петров¹, А.Никонов¹, В.Павлов¹, А.Айрапетов², В.Одинок², Г.Павлов², В.Сологуб² / ekralkina@mail.ru

K.Vavilin¹, E.Kralkina¹, P.Neklyudova¹, A.Petrov¹, A.Nikonov¹, V.Pavlov¹, A.Ayrapetov², V.Odinokov², G.Pavlov², V.Sologub²

Представлены результаты разработки и оптимизации параметров экспериментальной установки для нанесения покрытий из различных материалов, выполненной на основе гибридной плазменной системы, которая состоит из магнетронного и вакуумно-дугового распылительных источников, а также ассистирующего геликонного источника плазмы высокой плотности. Приведены результаты оптимизации индуктивного ВЧ-разряда во внешнем магнитном поле. Рассмотренный диапазон внешних параметров геликонного разряда соответствует области, где возможно резонансное возбуждение связанных между собой геликонной и косо́й ленгмюровской волн. В качестве основного параметра, подлежащего оптимизации, выбрана величина ионного тока в технологической камере. Рассмотрено влияние конструктивных особенностей гибридной плазменной системы (типа антенны, конфигурации магнитной системы, материала элементов конструкции источника плазмы) на значения ионного тока. Полученные результаты использованы при выборе технологических режимов магнетронного нанесения покрытий с воздействием геликонного разряда.

The paper presents the results of development and optimization of parameters of the experimental facility for coating of various materials based on hybrid plasma system, which consists of a magnetron and vacuum arc sputtering sources and an assisting high density helicon plasma source. The results of optimization of an inductive RF discharge in an external magnetic field are presented. Considered range of external parameters of helicon discharge corresponds to the area, where the resonant excitation of linked helicon and oblique Langmuir waves is possible. As the main parameter under optimization, the ion current in the processing chamber is chosen. The influence of structural characteristics of hybrid plasma system (antenna type, configuration of the magnetic system, the material of the structural elements of the plasma source) on the ion current is considered. The obtained results are used for the choice of operating mode of magnetron sputtering system with the helicon discharge.

Создание инновационной продукции в радиоэлектронике, машиностроении, медицинской технике и других областях, как правило, связано с использованием новых композиционных и многокомпонентных материалов. В последнее

десятилетие интенсивно развивались физико-химические методы покрытия поверхностей изделий сложной формы, созданы научные и технологические предпосылки для практического использования экологически чистых и безопасных

¹ Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова / Faculty of Physics of Lomonosov Moscow State University.

² ОАО "Научно-исследовательский институт точного машиностроения" / Research Institute of Precision Machine Manufacturing.

вакуумно-плазменных процессов при формировании многокомпонентных пленочных структур. Большое распространение получили вакуумно-плазменные системы на основе магнетронного и вакуумно-дугового газовых разрядов. Однако простое применение распылительных источников для осаждения пленок различных материалов не позволяет целенаправленно управлять наноструктурой и химическим составом наносимых слоев. Для оптимизации технологических процессов требуется введение ассистирующей ионной бомбардировки подложки одновременно с осаждением на нее пленок. Метод предполагает постоянную или периодическую бомбардировку ускоренными ионами тонких пленок в процессе их роста, то есть необходимо создать гибридную плазменную систему (ГПС), в которой кроме распылительных источников (РИ) должен присутствовать ионный источник. Наиболее эффективными являются ионные источники на основе плазмы высокой плотности (ПВП), которую наиболее просто получить с помощью геликонного газового разряда, далее такие ионные источники называются геликонными источниками (ГИ). Применение ГПС, состоящей из РИ и ГИ, позволяет проводить осаждение наноструктурированных покрытий с управляемой структурой и химическим составом. Такие покрытия и пленки существенно улучшают характеристики изделий и повышают их конкурентоспособность на рынке.

В работе [1] проанализированы результаты многочисленных экспериментов по нанесению покрытий с ассистированием ионным пучком. Показано, что наиболее значительные изменения

свойств осаждаемых пленок происходят, если на каждый осажденный атом приходится энергия в диапазоне от 1,0 до 100 эВ. Наибольших скоростей осаждения покрытий в настоящее время удается достичь с помощью вакуумно-дуговых источников. В работе [2] для ионного стимулирования вакуумно-дугового нанесения покрытий, то есть создания потока ионов, величина которого соответствует скоростям осаждения, предложено использовать индуктивный ВЧ-разряд, помещенный во внешнее магнитное поле с индукцией, соответствующей условиям резонансного возбуждения геликонных волн.

В настоящей работе представлены результаты оптимизации индуктивного ВЧ-разряда с внешним магнитным полем в макете плазменной системы, необходимой для разработки гибридной напылительной системы с ассистированием магнетронному и вакуумно-дуговому напылению покрытий потоком ускоренных ионов высокой плотности. Рассмотренный диапазон внешних параметров разряда соответствует области, где возможно резонансное возбуждение связанных между собой геликонной и косой ленгмюровской волн. Достижение резонанса позволяет оптимизировать энерговклад в разряд и получить плазму высокой плотности. Кроме того, проникновение ВЧ-полей внутрь плазмы в области резонанса позволяет получать протяженные области однородной плазмы. В качестве основного параметра, подлежащего оптимизации, была выбрана величина ионного тока в технологической камере. Рассмотрено влияние на значения ионного тока конструктивных особенностей ГПС: типа

Creation innovative products in electronics, mechanical engineering, medical technology and other fields, is usually associated with the use of new composite and multi-component materials. In the last decade, the physical-chemical methods of coating of surfaces of complex shapes are intensively developed, scientific and technological prerequisites for the practical use of environmentally friendly and safe vacuum plasma processes in the production of the complex film

structures are created. Vacuum plasma systems based on magnetron and vacuum-arc discharge are widespread. However, the simple use of sputtering sources for deposition of different materials doesn't allow flexible control of nanostructure and chemical composition of the deposited layer. Optimization of technological processes requires the introduction of the assisting ion bombardment of the substrate simultaneously with the deposition of the films. Method involves the continuous or

periodic bombardment with accelerated ions of the thin films during their growth. Thus, it is necessary to create a hybrid plasma system (HPS), in which besides sputtering sources (SS) the ion source must be used. The ion sources based on high-density plasma (HDP), which can be obtained by using of a Helicon discharge, are most effective. Further we will call such ion sources a Helicon sources (HS). The use of HPS, consisting of SS and HS, allows deposition of nanostructured coatings with

Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – вакуумная камера; 2 – турбомолекулярный насос; 3 – форвакуумный насос; 4 – широкодиапазонный датчик измерения давления WRG-S-NW25 S/S; 5 – зонды Ленгмюра; 6 – линейка с отверстиями для фиксации световода; 7 – световод; 8 – пояс Роговского; 9 – емкостной делитель

Fig.1. Scheme of the experimental facility: 1 – vacuum chamber; 2 – turbomolecular pump; 3 – booster pump; 4 – WRG-S-NW25 S/S wide range gauge; 5 – Langmuir probes; 6 – ruler with holes for fixation of the optical fiber; 7 – optical fiber; 8 – Rogowski loop; 9 – capacitive divider

антенны, конфигурации магнитной системы, материала элементов конструкции источника плазмы. Полученные результаты использованы для уточнения конструкции технологической плазменной системы, основанной на геликонном и магнетронных разрядах.

ГИБРИДНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ СИСТЕМА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Схема экспериментальной установки подробно описана в [3]. Экспериментальный образец ГПС (рис.1) состоял из двух цилиндрических камер разного диаметра. Верхняя часть

controlled structure and chemical composition. Such coatings and films improve significantly the performance of products and increase their competitiveness in the market.

In [1] the results of numerous experiments in the field of coatings with the assisting ion beam are analyzed. It is shown that the most significant changes in the properties of the deposited films occur if every deposited atom has energy in the range from 1.0 to 100 eV. The greatest deposition rate is achieved using a vacuum-arc sources. In [2] for ionic stimulation of vacuum-arc deposition

(creation of ion stream, the value of which corresponds to the deposition rate), it is proposed to use an inductive RF discharge, placed in an external magnetic field with the induction corresponding to the resonance conditions of excitation of helicon waves.

This paper presents the results of optimizing of inductive RF discharge with external magnetic field in the prototype of plasma system required for the development of hybrid sputtering system with magnetron and vacuum-arc deposition assisted by a stream of accelerated ions of high density. Considered range

of external parameters of helicon discharge corresponds to the area, where the resonant excitation of linked helicon and oblique Langmuir waves is possible. The resonance allows to optimize the energy contribution in the discharge and to obtain a high plasma density. In addition, the penetration of RF fields into the plasma in resonance area allows to obtain an extended regions of uniform plasma. As the main parameter under optimization, the ion current in the processing chamber is chosen. The influence of structural characteristics of hybrid plasma system

источника плазмы – газоразрядная камера из кварца – имела диаметр 10 см и высоту 25 см. Нижняя часть источника – технологическая камера, также изготовленная из кварца, имела диаметр 46 см и высоту 30 см. Ввод ВЧ-мощности осуществлялся с помощью соленоидальной антенны или антенны Nagoya III. Антенна располагалась на боковой поверхности газоразрядной камеры на расстоянии 12–16 см от ее верхнего торца. Концы антенны подсоединялись к выходу автоматической системы согласования, в свою очередь, подключенной к ВЧ-генератору AE Cesar 1310 с рабочей частотой 13,56 МГц и выходной мощностью 0–1000 Вт. Для измерения тока, текущего по антенне, использовался пояс Роговского.

В работе применялись два типа магнитной системы. В первом случае два электромагнита, расположенные в верхней и нижней частях технологической камеры, позволяли создавать в ней однородное в пределах 7% магнитное поле с индукцией до 7 мТл. При этом в газоразрядной камере возникало слабо расходящееся магнитное поле. Во втором случае с помощью дополнительной катушки создавалось однородное магнитное поле в газоразрядной камере, в то время как в технологической камере возникало расходящееся поле.

Диагностический стенд позволял измерять мощность ВЧ-генератора, отдаваемую во внешнюю цепь, ток, текущий через антенну, ВЧ напряжение на концах антенны, спектр свечения плазмы и пространственное распределение

интенсивности свечения плазмы. Стандартная зондовая методика позволяла измерять ВАХ зондов, ионный ток насыщения, концентрацию и энергетическое распределение электронов.

Эксперименты выполнялись в диапазоне давлений от 0,7 до 3,0 мТорр, при мощностях ВЧ-генератора 150–400 Вт и рабочей частоте 13,56 МГц.

ПАРАМЕТРЫ ГЕЛИКОННОГО РАЗРЯДА В ГИБРИДНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СИСТЕМЕ

Экспериментальные исследования разряда в макете источника плазмы, выполненные с двумя типами магнитных систем, показали, что наложение магнитного поля приводит к существенным изменениям протяженности разряда, как при использовании соленоидального индуктора, так и антенны Nagoya III. При отсутствии магнитного поля разряд концентрировался в верхней газоразрядной камере. Увеличение величины магнитного поля при давлениях менее 1 мТорр сначала приводило к появлению плазмы в верхней части нижней газоразрядной камеры, затем, в случае использования однородного магнитного поля, длина интенсивно светящейся части разряда в нижней камере начинала расти, и, наконец, разряд замыкался на нижний фланец, формируя протяженный плазменный столб (рис.2а). В случае магнитной системы, создающей однородное магнитное поле в технологической камере, диаметр плазменного столба примерно равнялся

(antenna type, configuration of the magnetic system, the material of the structural elements of the plasma source) on the ion current is considered. The obtained results are used for the choice of operating mode of magnetron sputtering system with the helicon discharge.

HYBRID PLASMA SYSTEM AND MEASUREMENT TECHNIQUE

Scheme of the experimental facility is described in detail in [3]. Experimental prototype of HPS (Fig.1) consisted of two cylindrical chambers of different diameters. The upper part of the plasma

source is a gas discharge chamber made of quartz, which had a diameter of 10 cm and height of 25 cm. The lower part of the source is processing chamber, also made of quartz, which had a diameter of 46 cm and height of 30 cm. The solenoidal antenna or Nagoya III antenna was used for input of RF power. The antenna was located on the lateral surface of the gas discharge chamber at a distance of 12–16 cm from its upper end. The ends of the antenna were connected to the output of the automatic matching systems connected to AE Cesar 1310 RF generator with an operating frequency

of 13.56 MHz and an output of 0–1000 watts. The Rogowski loop was used to measure the current in the antenna.

Two types of magnetic system were used. In the first case, two electromagnets located in the upper and lower parts of the processing chamber, allowed to create a uniform (within 7%) magnetic field up to 7 mT. In this case, a weakly diverging magnetic field appeared in gas discharge chamber. In the second case by means of additional coil a uniform magnetic field in the gas discharge chamber was created, while in the processing chamber a divergent field has appeared.

Рис. 2. Фотографии разряда в случае однородного (а) и неоднородного (б) внешнего магнитного поля

Fig. 2. Photos of the discharge in homogeneous (a) and heterogeneous (b) external magnetic fields

диаметру верхней газоразрядной камеры. При использовании в технологической камере расходящегося магнитного поля диаметр плазменного столба увеличивался. Изменение конфигурации магнитного поля позволяло управлять положением плазменного столба, в том числе поворачивать его под углом, близким к 90° (рис. 2).

Оценки показывают, что образование плазменного столба происходит при давлениях, когда длина свободного пробега превышает

геометрические размеры источника плазмы. Таким образом, качественно полученные результаты можно объяснить следующим образом. Ток, текущий по антенне, возбуждает разряд в верхней газоразрядной камере, появляется плазма. Внешнее магнитное поле препятствует движению электронов поперек магнитного поля, и они преимущественно движутся вдоль силовых линий. Если длина свободного пробега электронов оказывается достаточно большой, электроны выходят из верхней камеры, и появляется разряд в нижней камере. При достаточно больших длинах свободного пробега и индукции внешнего магнитного поля разряд замыкается на нижний заземленный фланец. Движение электронов поперек магнитного поля затруднено, поэтому в случае использования однородного магнитного поля наблюдается резко очерченный в радиальном направлении плазменный столб. Искривление силовых линий приводит к изменению траекторий движения электронов и положения плазменного столба. Рост давления приводит к уменьшению длины свободного пробега и исчезновению плазменного столба. Так, при давлениях более 1 мТор не происходит формирования протяженного плазменного столба, причем длина ярко светящейся части разряда с ростом давления уменьшается.

На рис. 3 показано изменение аксиального распределения зондового ионного тока насыщения с увеличением индукции магнитного поля, измеренного при использовании магнитной

Diagnostic stand allowed to measure the power of RF generator delivered to an external chain, the current through the antenna, the RF voltage at the ends of the antenna, the emission spectrum of the plasma and spatial distribution of the luminescence intensity of the plasma. Standard probe method allowed to measure current-voltage characteristic of probes, the ion saturation current, concentration and energy distribution of electrons.

The experiments were carried out in the pressure range from 0.7 to 3.0 mTorr, with the output of the RF generator from 150 to 400

W and the working frequency of 13.56 MHz.

HELICON DISCHARGE PARAMETERS IN THE HYBRID PLASMA SYSTEM

Discharge experimental tests in the plasma source layout performed with two types of magnetic systems showed that the application of a magnetic field leads to significant changes in the length of a discharge in using both a solenoidal inductor and the Nagoya III antenna. In the absence of a magnetic field, a charge is concentrated in the top gas discharge chamber. An increase in the magnetic field

strength at pressures below 1 mTorr first led to the emergence of plasma in the upper portion of the lower discharge chamber, then, in the case of a uniform magnetic field, the length of the intensely luminous part of the discharge in the lower chamber was beginning to grow, and finally the discharge ended with the lower flange by creating an extended plasma column (2a). In the case of a magnetic system, which creates a uniform magnetic field in the processing chamber, the diameter of the plasma column is approximately equal to the diameter of

Рис.3. Зависимость зондового ионного тока насыщения от расстояния до верхнего фланца при различных значениях внешнего магнитного поля: а – магнитная система первого типа, соленоидальная антенна; б – магнитная система первого типа, антенна Nagoya III; с – магнитная система второго типа, соленоидальная антенна

Fig.3. Dependence of probe ion saturation current on the distance from the top flange at various values of external magnetic field: а – magnetic system of the first type, solenoidal antenna; б – magnetic system of the first type, Nagoya III antenna; с – magnetic system of the second type, solenoidal antenna

системы первого типа, соленоидального индуктора и антенны Nagoya III, а также магнитной системы второго типа и соленоидального индуктора. Видно, что при отсутствии магнитного поля разряд сосредоточен в верхней части источника плазмы, по мере увеличения магнитного поля в случае использования магнитной системы первого типа максимум ионного тока перемещается в нижнюю камеру источника плазмы, и

при магнитных полях, превышающих 36 Гс, разряд локализуется в нижней части источника. Указанный эффект наблюдается при всех рассмотренных мощностях ВЧ-генератора, причем максимальные значения ионного тока растут пропорционально вложенной мощности. Наибольшие значения ионного тока насыщения достигаются при использовании соленоидальной антенны. Применение магнитной системы второго типа не

the upper discharge chamber. In using in a processing chamber of a divergent magnetic field the diameter of the plasma column increased. A change in the magnetic field configuration makes it possible to control the position of the plasma column and also turn it at an angle close to 90° (Fig.2).

Estimates show that the creation of the plasma column takes place at pressures, when the mean free path is greater than the geometric dimensions of the plasma source. Thus, qualitative results can be explained as follows. The current flowing through the

antenna excites a discharge at the top of the gas discharge chamber, and plasma appears. An external magnetic field interferes with the movement of electrons across the magnetic field, and they mostly move along the field lines. If the electron mean free path is sufficiently large, the electrons go out from the upper chamber, and a discharge occurs in the lower chamber. For sufficiently large mean free paths and the external magnetic field density the discharge ends with the lower grounded flange. The motion of electrons across the

magnetic field is constrained, so in the case of a uniform magnetic field, a plasma column sharply defined in the radial direction can be recorded. The curvature of the field lines results in a change in the electron trajectories and position of the plasma column. Pressure increases lead to a decrease in the mean free path and the disappearance of the plasma column. Thus, at pressures greater than 1 mTorr an extended plasma column is not created, and the length of the brightly glowing discharge decreases with increasing pressure.

Рис. 4. Аксиальный профиль амплитуды ВЧ-поля B_z
Fig.4. Axial profile of the amplitude of the RF field (B_z)

позволяет получить высокий ионный ток насыщения в технологической камере.

Таким образом, оптимальной конструкцией макета гибридной системы является двухкамерный индуктивный источник плазмы, оснащенный соленоидальной антенной и магнитной системой, позволяющей создавать в технологической камере однородное, в пределах 7%, маг-

нитное поле с индукцией до 7 мТл, а в газоразрядной камере – слабо расходящееся магнитное поле.

В рассмотренном диапазоне индукции внешнего магнитного поля (0–60 Гс) и мощностей ВЧ-генератора (до 600 Вт) выполняется неравенство:

$$\omega_{Li} \ll \omega < \Omega_e \ll \omega_{Le}, \quad (1)$$

где ω_{Li} , ω , Ω_e , ω_{Le} – ионная ленгмюровская, круговая рабочая, электронная циклотронная и ленгмюровская частоты. Теоретические модели индуктивного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле [4], предсказывают, что при условиях (1) возможно возбуждение двух связанных между собой волн: геликонноподобной и квазиэлектростатической кривой ленгмюровской.

Измерения ВЧ продольной компоненты магнитного поля B_z показали, что при магнитных полях 28 Гс и выше в источнике плазмы действительно формируется частично бегущая волна, профиль амплитуды которой показан на рис.4. Повышение индукции внешнего магнитного поля приводит к увеличению числа полуволн n , укладывающихся на длине источника плазмы (рис.2б). Рост магнитного поля сопровождается увеличением амплитуды поля B_z в технологической камере.

КОНСТРУКЦИЯ ГПС

Полученные результаты позволили оптимизировать конструкцию ГПС (рис.6).

Fig.3 shows the change in the axial distribution of the probe ion saturation current with the magnetic field strength measured in using the magnetic system of the first type, a solenoid inductor and Nagoya III antenna as well as the magnetic system of the second type and a solenoid coil. It can be seen that in the absence of a magnetic field, the discharge is concentrated at the top of the plasma source, as long as the magnetic field is increased in the case of the magnetic system of the first type the maximum ion current moves into the lower chamber of the plasma source, and

in the magnetic fields exceeding 36 G, a discharge is localised at the bottom of the source. This effect is observed in all the above RF-generator power, and maximum values of the ion current increase in proportion to the input power. The greatest value of the ion saturation current is achieved by using a solenoidal antenna. Application of the magnetic system of the second type does not allow obtaining a high ion saturation current in the processing chamber.

Thus, the optimal design of the hybrid system layout is a two-chamber inductive plasma

source equipped with a solenoidal antenna and a magnetic system that makes it possible to create in the processing chamber a magnetic field homogenous within 7% with the induction of up to 7 mT, and a slightly diverging magnetic field in the gas discharge chamber.

In the above inductive range of the external magnetic field (0–60 G) and RF generator power (600 watts), the inequality occurs:

$$\omega_{Li} \ll \omega < \Omega_e \ll \omega_{Le}, \quad (1)$$

where ω_{Li} , ω , Ω_e , ω_{Le} are the ion plasma frequency, circular working frequency, electron cyclotron frequency and Langmuir

Установка состоит из двух частей. Основная часть – это металлическая камера цилиндрической формы, диаметром 500 мм и высотой 350 мм. На дне камеры располагается вращающийся столик для размещения обрабатываемых образцов. В процессе отработки технологических режимов ГПС на столике была смонтирована система зондов с целью контроля параметров плазмы. Для вывода сигналов на регистрирующую аппаратуру предусмотрен специальный порт. Для проведения спектрометрических исследований параметров плазмы над столиком служат два окна оптического контроля, расположенные строго друг против друга. На боковых сторонах камеры установлены магнетрон и вакуумно-дуговой источник. Снизу основной камеры расположен электромагнит, позволяющий получать индукцию внешнего магнитного поля в области столика – до 150 Гс.

В верхней части основной камеры смонтирован кварцевый цилиндрический источник геликонной плазмы длиной 250 мм и диаметром 220 мм. Сверху объем источника закрыт глухим стеклянным фланцем, а снизу металлическим фланцем с отверстием, обеспечивающим выход плазмы в основную камеру. Два электромагнита обеспечивают создание магнитного поля в технологической камере. Для возбуждения разряда используется соленоидальная антенна, расположенная на внешней поверхности кварцевой камеры. Концы антенны через систему согласования подключались к ВЧ-генератору с рабочей

Рис.5. Зависимость числа полуволн n , укладывающихся на длине источника плазмы, от величины индукции внешнего магнитного поля

Fig.5. Dependence of the number of half wavelengths (n) that fit inside the length of the plasma source on the external magnetic field induction

частотой 13,56 МГц и выходной мощностью до 1000 Вт.

Для исследования однородности плазмы в области расположения подложки на столике было смонтировано 25 пристеночных плоских зонда. 13 зондов располагались параллельно оси симметрии магнетрона (далее – ось x) и 12

frequency. According to the theoretical models of the RF inductive discharge placed in an external magnetic field [4], under the conditions (1) two interconnected waves, i.e. helicon-like, quasi-electrostatic and oblique Langmuir can be excited.

HF measurements of the longitudinal component of the magnetic field B_z have shown that in the magnetic fields of 28 G or more in the plasma source a partly travelling wave, the amplitude profile of which is shown in Fig.4, is really created. An increase in the induction of the external magnetic field leads to an

increase in the number of half-waves n placed on the length of the plasma source (Fig.2b). The growth of the magnetic field is accompanied by an increase in the amplitude of the B_z field in the processing chamber.

HPS DESIGN

The obtained results allow optimising the HPS design (Fig.6).

The installation consists of two parts. The main part is a metal chamber of the cylindrical shape with a diameter of 500 mm and a height of 350 mm. At the bottom of the chamber there is the turntable table for placing

the processed samples. In testing the technological modes of HPS a couple of probes were mounted on the table in order to control the plasma parameters. To output signals to the recording equipment there is a special port. To carry out the spectrometric researches of plasma parameters, there are two optical inspection window placed strictly opposite each other above the table. On the sides of the chamber a magnetron and a vacuum arc source are installed. Below the main chamber there is an electromagnet which makes it possible to obtain the induction of the

Рис.6. Чертеж (а) и фотография (б) установки с гибридной плазменной системой

Fig.6. Drawing (a) and photo (b) of the facility with hybrid plasma system

зондов – перпендикулярно ей (далее – ось у). Для измерения ионного тока насыщения на зонды подавался отрицательный относительно стенок основной камеры потенциал 60 В. Излучение плазмы через световод передавалось на вход монохроматора МДР-41, на выходе которого располагался ФЭУ-100. Сигнал с ФЭУ усиливался и поступал на АЦП, встроенный в компьютер.

Сканирование спектра осуществлялось в диапазоне 400–700 нм. Измерения проводились в среде аргона в диапазоне давлений от 0,2 до 1,5 Па.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГПС

Экспериментальные исследования разряда в ГПС показали, что наложение однородного магнитного поля приводит к существенным

external magnetic field in the table area, up to 150 G.

In the upper part of the main chamber a cylindrical quartz helicon plasma source with a length of 250 mm and a diameter of 220 mm is mounted. Above the volume of the source is closed by a hollow glass flange and by metal flange with an opening providing access to the main plasma chamber at the bottom. Two electromagnets provide a magnetic field in the processing chamber. For excitation of the discharge, a solenoidal antenna placed on the outside of the quartz chamber is used. The ends of the antenna were

connected through the matching system to the HF generator with an operating frequency of 13.56 MHz and an output power of 1000 watts.

To study the plasma homogeneity in the substrate 25 flat near-wall probes area were mounted on the table. 13 probes are parallel to the symmetry axis of the magnetron (the x axis) and 12 probes perpendicular thereto (the y axis). To measure the ion saturation current, a potential of 60 V negative in relation to the main chamber walls were supplied to the probes. The plasma radiation was transmitted through the light guide to the input of the MDR-41

monochromator, at the output of which the FEU-100 photomultiplier tube was placed. A signal from the photomultiplier tube was amplified and fed to the ADC built in the computer. The spectrum was scanned in the range of 400–700 nm. Measurements were carried out in the argon environment at pressures ranging from 0.2 Pa to 1.5 Pa.

OPTIMIZATION OF OPERATION MODES OF HPS

Experimental investigations of discharge in HPS showed that the superposition of a homogeneous magnetic field leads

Рис.7. Радиальное распределение зондового тока насыщения вдоль осей x (а) и y (б). Давление аргона 0,75 Па; $I_{top} = 5A$; $I_{bot} = 5A$
 Fig.7. Radial distribution of probe saturation current along the x -axis (a) and y -axis (b). Argon pressure of 0.75 Pa; $I_{top} = 5A$; $I_{bot} = 5A$

изменениям протяженности разряда. При магнитном поле порядка 40 Гс разряд замыкается на нижний фланец, формируя протяженный плазменный столб. Диаметр плазменного столба примерно равен 20 см. На рис.7 показаны результаты измерения радиального распределения ионного тока насыщения вдоль осей x и y , полученные при работе геликонного разряда, магнетрона в отдельности и двух разрядов совместно. Как видно, совместная реализация

двух разрядов приводит к существенному увеличению ионного тока, значение которого становится выше, чем простая сумма величин, измеренных при отдельной работе индуктивного геликонного ВЧ-источника и магнетрона. Этот вывод справедлив при всех рассмотренных условиях экспериментов. Рост давления от 0,3 до 0,7 Па, как показали эксперименты, приводит к существенному улучшению однородности радиального распределения ионного

to significant changes in the length of the discharge. With a magnetic field of about 40 Gauss, the discharge closes on the bottom flange, forming a long plasma column. The diameter of the plasma column is approximately equal to 20 cm. Fig.7 shows the results of measurement of radial distribution of ion saturation current along x and y axes obtained in the helicon discharge mode, in the magnetron mode and in the combined mode of the two discharges. As can be seen, the joint work of the two discharges leads to a substantial increase of ionic current whose

value is higher than the sum of the values measured in separate modes for inductive helicon RF source and the magnetron. This conclusion is true in all the considered experimental conditions. Growth of the pressure from 0.3 to 0.7 Pa, as shown by the experiments, leads to substantial improvement in the uniformity of the radial distribution of ion current, however, its absolute value declines. Increasing of pressure to 1 Pa leads to a further decrease of ion current.

The results presented above indicate the impact of the magnetron on parameters of the

hybrid sputtering system. The influence of the HS of plasma on the operation of the magnetron with a titanium target can be estimated on the basis of spectral studies of plasma. Fig.8 shows a part of the emission spectrum of the plasma, where intensive lines of TiI are localized, which was measured at a pressure of 0.3 Pa in the cases of operation of the magnetron and of joint operation of the magnetron and helicon source. The experiments showed that when only the magnetron operates, spectral lines of titanium are practically not identified due to

Рис.8. Участок спектра свечения разряда, где расположены интенсивные линии TiI

Fig.8. Part of the emission spectrum of the discharge with intensive lines of TiI

тока, однако его абсолютная величина при этом падает. Увеличение давления до 1 Па приводит к дальнейшему падению значений ионного тока.

Результаты, представленные выше, свидетельствуют о влиянии работы магнетрона на параметры гибридной напылительной системы. Влияние ГИ плазмы на работу магнетрона с титановой мишенью можно оценить на основа-

Таблица. Толщина пленок Al, напыленных на кремниевые подложки в различных режимах

Thickness of Al films evaporated on silicon substrate in different modes

Номер образца Sample number	Толщина пленки, нм Film thickness, nm
1	280
2	430
3	470

нии спектральных исследований плазмы. На рис.8 показан участок спектра свечения плазмы, где локализуются интенсивные линии TiI, измеренный при давлении 0,3 Па в случае работы только магнетрона и совместной работы магнетрона и геликонного источника. Эксперименты показали, что при работе только магнетрона спектральные линии титана практически не идентифицируются в связи с малым количеством атомов в разряде. Однако при работе гибридного источника интенсивность свечения спектральных линий атомов титана повышается, что говорит о росте их концентрации (рис.8). Кроме того, установлено, что интенсивность линий титана в области подложки, где должен располагаться образец, немногим уступает интенсивности в области установки магнетрона.

В таблице приведены значения толщины пленок Al, напыленных на кремниевые подложки при работе только магнетрона (1), при одновременной работе магнетрона и геликона (2), а

small quantity of atoms in the discharge. However, in hybrid mode the emission intensity of spectral lines of titanium atoms increases that indicates the increase in their concentration (Fig.8). In addition, it was found that the intensity of the titanium lines in the area of the substrate, where should be placed the sample, is a little less than the intensity in the location of the magnetron.

The table presents the thicknesses of Al films evaporated on silicon substrate during the operation only of the magnetron (1), during of the simultaneous

operation of the magnetron and helicon (2) and during simultaneous operation of the magnetron and Helicon (3) with the bias to the substrate. The time of sputtering in all three cases was the same. The thickness of the films was measured on the chips of the plates using SEM Supra 40.

As can be seen, during the joint operation of the magnetron and helicon the sputtering rate increases. This is because the additional helicon discharge, as shown by the probe measurements, increases the plasma density. This leads to an increase of the ion flow that bombarding

the target of the magnetron and to an increase of the rate of her sputtering. Apparently, the bias to the substrate leads to an increase in the number of aluminum ions, which reach the substrate and are involved in the formation of the film. The latter contributes to further increasing of the growth rate of the film.

Studies of the samples surface showed significant differences in its morphology depending on sputtering mode (Fig.9).

The Al films were intended for use as a structural element of the anode layer for thin-film Li-ion batteries, in which the developed

Рис.9. Поверхность образцов пленки, полученных в следующих режимах: а – магнетронное распыление алюминиевой мишени; б – одновременная работа магнетронного и геликонного источников; в – одновременная работа магнетронного и геликонного источников при смещении на подложку

Fig.9. Surface of the film samples obtained in the following modes: a – magnetron sputtering of aluminum target; b – simultaneous operation of the magnetron and helicon sources; c – simultaneous operation of the magnetron and helicon sources with the bias to the substrate

также при одновременной работе магнетрона и геликона (3) при условии, что дополнительно на подложку подавалось смещение. Время напыления в трех рассмотренных случаях совпадало. Толщины пленок были замерены по сколу пластин на СЭМ Supra 40.

Как видно, при совместной работе магнетрона и геликона скорость напыления пленки растет. Это связано с тем, что при включении дополнительного геликонного разряда, как показали зондовые измерения, плотность плазмы возрастает. Это приводит к увеличению потока ионов, бомбардирующих мишень магнетрона

и увеличению скорости распыления мишени. По-видимому, подача смещения на подложку приводит к увеличению числа ионов алюминия, попадающих на подложку и участвующих в формировании пленки. Последнее способствует дополнительному увеличению скорости роста пленки.

Исследования поверхности образцов показали существенные различия ее морфологии в зависимости от режима напыления пленок (рис.9).

Пленки Al предназначались в качестве структурного элемента анодного слоя для тонкопеле-

morphology of the surface layers have an important role. As can be seen, the surface of the three considered samples of the films has features of a polycrystalline structure with "large" blocks. These polycrystalline blocks are least pronounced in case of the joint operation of the magnetron and helicon discharge. The chip of the film sample, obtained in case of bias to the substrate, differs from other samples because it is more fine-dispersed, but with a larger effective area (Fig.10).

Thus, the experiments demonstrated that the assisting helicon

discharge allows to increase the rate of magnetron sputtering. In addition, the obtained results indicate good prospects of the adjustment the film structure by changing parameters of the helicon discharge.

CONCLUSION

The investigation of the parameters of the helicon plasma source showed the promise of the chosen design of the HPS. The best solution is a double-chamber inductive source equipped with a solenoidal antenna and a magnetic system that allows to create uniform magnetic field of not

less than 7 mT in the processing chamber and a weakly diverging magnetic field in the gas discharge chamber.

The study of plasma parameters in RF hybrid plasma system based on helicon or magnetron discharges, showed the mutual influence of two types of discharge, leading to an increase in the plasma density and in the concentration of sputtered atoms.

The project was financially supported by the Ministry of education and science of the Russian Federation. Agreement No. 14.576.21.0021 of 30 June 2014. The unique identifier of applied research (project) is RFMEFI57614X0021. ■

Рис.10. Сколы образцов пленок, полученных в следующих режимах: а – магнетронное распыление алюминиевой мишени; б – одновременная работа магнетронного и геликонного источников; с – одновременная работа магнетронного и геликонного источников при смещении на подложку

Fig.10. Chips of film samples obtained in the following modes: а – magnetron sputtering of aluminum target; б – simultaneous operation of the magnetron and helicon sources; с – simultaneous operation of the magnetron and helicon sources with the bias to the substrate

ночных Li-ионных аккумуляторов, в которых важную роль играет развитая морфология поверхности слоев. Как видно, поверхность трех рассмотренных образцов пленок имеет признаки поликристаллической структуры с "крупными" блоками. Такие поликристаллические блоки наименее выражены при совместной работе магнетрона и геликонного разряда. Скол пленки образца, полученного при подаче смещения на подложку, отличается от сколов пленок остальных образцов – он более мелкодисперсный, но с большей эффективной площадью (рис.10).

Таким образом, выполненные эксперименты показали, что наличие геликонного ассистирующего разряда позволяет увеличить скорость магнетронного напыления пленок. Кроме того, полученные результаты указывают на хорошие перспективы управления структурой пленок путем изменения параметров геликонного разряда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования параметров геликонного источника плазмы показали перспективность выбранной конструкции ГПС. Оптимальным решением является двухкамерный индуктивный источник, оснащенный соленоидальной антенной и магнитной системой, позволяющей создавать в технологической камере однородное магнитное поле с индукцией не менее 7 мТл, а в газоразрядной камере – слабо расходящееся магнитное поле.

Результаты исследования параметров плазмы в гибридной плазменной ВЧ-системе, основанной на геликонном и магнетронном разрядах, показали взаимное влияние двух типов разряда, приводящее к увеличению плотности плазмы и концентрации распыляемых атомов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ. Соглашение № 14.576.21.0021 от 30 июня 2014 г. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57614X0021.

ЛИТЕРАТУРА

1. Colligon J.S. Ion-assisted sputter deposition. – Phil. Trans. R. Soc. Lond. A (2004), v. 362, pp. 103–116.
2. Шпак А., Руденко Э., Коротах И., Семенюк В., Шамрай К., Одинокое В., Павлов Г., Сологуб В. Плазменный источник низкотемпературного формирования нанокластеров металла-катализатора // Наноиндустрия. 2009. № 4. С. 12–15.
3. Александров А., Петров А., Вавилин К., Крайкина Е., Неклюдова П., Никонов В., Павлов А., Айрапетов А., Одинокое В., Сологуб В., Павлов Г. Исследование параметров плазмы геликонного разряда в макете ВЧ гибридной плазменной системы // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 25–28.
4. Силин В.П., Рухадзе А.А. Электромагнитные свойства плазмы и плазмopodobных сред. – Госатомиздат, 1961.