УСТАНОВКА С ГИБРИДНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ РЕАКТОРОМ

FACILITY WITH HYBRID PLASMA REACTOR

УДК 621.793, ВАК 05.04.06, DOI:10.22184/1993-8578.2016.70.8.104.108

А.Айрапетов¹, Е.Кралькина², П.Неклюдова², В.Одинок¹, В.Павлов², Г.Павлов¹, В.Солозуб¹ / ekralkina@mail.ru; solo@niitm.ru
A.Ayrapetov¹, E.Kralkina², P.Neklyudova¹, V.Odinokov², V.Pavlov², G.Pavlov¹, V.Sologub¹

Рассмотрена конструкция инновационной установки "Геликон-ТМ" для ионно-стимулированного формирования одно- и многокомпонентных металлических, диэлектрических и полупроводниковых слоев. Изучено влияние плазмы геликонного разряда на структуру пленок.
The design of an innovative Helicon-TM system for ion-induced deposition of single and multicomponent metal, dielectric and semiconductor layers is described. The influence of the helicon plasma discharge on the structure of the films is studied.

В последнее десятилетие для улучшения ресурсных и функциональных характеристик изделий машиностроения, электроники и медицины взамен гальванотехнических методов модификации поверхностей все большее распространение получают экологически чистые вакуумно-плазменные системы формирования многокомпонентных тонкопленочных структур, в том числе на основе магнетронного и вакуумно-дугового газовых разрядов. Причем сочетание в одной напылительной системе магнетронного и вакуумно-дугового источников позволяет охватить практически неограниченную номенклатуру распыляемых материалов: металлов, полупроводников и диэлектриков, – обеспечивая получение качественных покрытий с достаточно высокой скоростью осаждения. Однако для целенаправленного управления наноструктурой, фазовым и химическим составом носимых слоев требуются дополнительные технические средства. Введение ассистирующей ионной бомбардировки подложки одновременно с осаждением на нее пленок из распылительных источников с реализацией гибридной плазменной системы (ГПС) решает эту задачу. Особенно эффективными являются источники на основе плазмы высокой плотности, которую наиболее просто получить с помощью индуктивного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле. Такие источники плазмы называются геликонными. При использовании геликонного разряда, в отличие от обычного, в котором варьируется только

мощность, существуют дополнительные инструменты для управления составом и структурой плазмы, а именно величина и конфигурация внешних магнитных полей. Регулирование указанных параметров позволяет управлять плотностью плазмы и ее пространственным распределением в области подложкодержателя [1–3].

Инновационная установка "Геликон-ТМ" спроектирована для проведения исследований и разработки широкого класса новых управляемых технологических процессов нанесения функциональных покрытий различных материалов методами магнетронного распыления и/или электродугового испарения в плазме геликонного разряда. Плазмостимулированные процессы осаждения с регулируемой плотностью и энергией плазменного воздействия обеспечивают управляемое наноструктурирование покрытий, которые могут использоваться в различных областях науки и техники (нано-, микро-, опто-, фото- и радиоэлектроника, медицина, накопители энергии и др.). Геликонный разряд обеспечивает в области подложкодержателя концентрацию плазмы до 10^{12} см^{-3} , а подаваемое на подложку ВЧ-смещение – энергию ионов от 10 до 300 эВ. Это позволяет разрабатывать инновационные технологические процессы плазмостимулированного осаждения, а также "сухого" травления и очистки. Нанесение покрытий одновременно методами физического (physical vapor deposition, PVD) и плазмохимического (plasma enhanced chemical vapor deposition, PE CVD) осаждения материалов дает возможность в значительной

¹ АО "Научно-исследовательский институт точного машиностроения" / Research Institute of Precision Machine Manufacturing.
² Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова / Faculty of Physics of Lomonosov Moscow State University.

мере управлять характеристиками получаемых структур.

Конструкция установки, совмещающей магнетронный, дуговой и магнитоактивированный индуктивный ВЧ-разряды, приведена на рис.1.

Установка состоит из двух частей. Основная часть – это металлическая технологическая камера цилиндрической формы диаметром 500 мм и высотой 350 мм. На дне камеры находится вращающийся столик для размещения обрабатываемых образцов. Для проведения спектрометрических исследований параметров плазмы над столиком имеются два окна оптического контроля, расположенные строго друг против друга. На боковых сторонах технологической камеры установлены магнетронный и вакуумно-дуговой источники. В настоящей статье приведены результаты экспериментов при работе только магнетрона.

Над основной камерой смонтирована кварцевая разрядная камера длиной 250 мм и диаметром 220 мм. Сверху объем камеры закрыт глухим

стеклянным фланцем, а снизу – металлическим фланцем с отверстием, обеспечивающим выход плазмы в основную камеру.

Магнитная система состоит из двух электромагнитов, расположенных в верхней и нижней частях технологической камеры. Электромагниты обеспечивают создание расходящегося магнитного поля в области разрядной камеры и слабо расходящегося к подложке (с преимущественной продольной компонентой) магнитного поля в технологической камере.

Величина магнитного поля в каждой конкретной точке объема технологической камеры определяется токами I_{top} и I_{bot} , текущими через верхний и нижний электромагниты соответственно, причем одно и то же значение индукции магнитного поля можно обеспечить, задавая различные соотношения между токами магнитов. В таблице представлены значения индукции магнитного поля, достигаемые в области расположения антенны, в центре технологической камеры

In the last decade, to improve the reliability and performance of machinery, electronics and medical equipment, the electrodeposition methods of surface modification are increasingly replaced by environmentally friendly vacuum-plasma systems of multi-component thin-film structures deposition, in particular, on the basis of the magnetron and vacuum-arc gas discharge. In addition, the combination of magnetron and vacuum arc sources in a single sputtering system allows to cover almost an unlimited range of deposited materials, including metals, semiconductors and insulators, and to provide a high quality and rather high rate of deposition. However, targeted control of the nanostructure, phase and chemical composition of the deposited layers requires additional hardware. The use of the assisting ion bombardment of the substrate simultaneously with the deposition of films and the implementation of the hybrid plasma

system (GPS) solves this problem. The sources on the basis of high density plasma, which can be obtained by using inductive RF discharge placed in an external magnetic field, are especially effective. Such plasma sources are called helicon sources. Helicon source, in contrast to the conventional one, in which only power can be adjusted, provides additional capabilities to control the composition and structure of the plasma, namely the size and configuration of external magnetic fields. Regulation of these parameters allows control of plasma density and its spatial distribution in the area of the substrate holder [1-3].

Innovative Helicon-TM system is designed for research and development of a wide range of new controlled technological processes for deposition of functional coatings of various materials by magnetron sputtering and/or arc evaporation in plasma of helicon discharge. Plasma-enhanced deposition process with a controlled plasma

density and energy provides a controlled nanostructuring of the coatings that can be used in various fields of science and technology (nano-, micro-, opto-, photo- and radio electronics, medicine, energy storage, etc.). Helicon discharge provides in the area of the substrate holder the plasma density of up to 10^{12} cm^{-3} , and applied RF bias – the ion energy from 10 to 300 eV. This allows to develop innovative technological processes of plasma-enhanced deposition and also of dry etching and cleaning. Coating with simultaneous use of physical vapor deposition and plasma enhanced chemical vapor deposition allows to implement enhanced control of the characteristics of the resulting structures.

The design of the system, which combines magnetron, arc and magnetic-activated inductive RF discharges is shown in Fig.1.

The system consists of two parts. The main part is a metal process chamber of the cylindrical shape with a diameter of 500 mm and a

Рис.1. Схема (а) и фотография (б) установки, совмещающей магнетронный, дуговой и индуктивный ВЧ-разряды с внешним магнитным полем

Fig.1. Diagram (a) and photo (b) of facility combining magnetron, arc and inductive RF discharges with external magnetic field

и вблизи подложки, при различных значениях I_{top} , I_{bot} .

Для возбуждения индуктивного ВЧ-разряда используется соленоидальная антенна, расположенная на внешней поверхности кварцевой камеры. Концы антенны через систему согласования подключаются к ВЧ-генератору с рабо-

чей частотой 13,56 МГц и выходной мощностью до 1000 Вт. ВЧ-генератор используется для возбуждения и поддержания магнетронного разряда.

Результаты исследования параметров геликонного источника плазмы показали перспективность выбранной конструкции ГПС, основан-

height of 350 mm. At the bottom of the chamber there is a rotating table for placement of processed samples. Two optical windows are located opposite each other above the table for the spectroscopic studies of plasma parameters. The magnetron and vacuum-arc sources are installed on the side faces of a process chamber. This paper presents the results of experiments with the use of only magnetron.

A quartz discharge chamber with a length of 250 mm and a diameter of 220 mm is mounted above the main chamber. The upper volume of the chamber is

closed by a blind glass flange, and the bottom - by a metal flange with an outlet that provides the output of the plasma into the main chamber.

The magnetic system consists of two electromagnets located in the upper and lower parts of a process chamber. Electromagnets create a divergent magnetic field in the discharge chamber and of slightly diverging to the substrate (with a predominant longitudinal component) magnetic field in the processing chamber.

The magnetic field in each point of the volume of the process chamber is determined by the I_{top} and

I_{bot} currents flowing through the upper and lower electromagnets respectively, and the same value of magnetic field induction can be achieved by setting different ratios between the currents of the magnets. The table shows the values of magnetic field induction achieved in the area of the antenna, in the center of the process chamber, and near the substrate, at various values of I_{top} , I_{bot} .

The solenoidal antenna located on the outer surface of the quartz chamber is used for the excitation of inductive RF discharge. The ends of the antenna are connected through the matching system to

Соотношение между токами магнитов и величинами индукции магнитного поля в области подложки и разрядной камеры
Correlation between currents of magnets and magnetic field induction in areas of substrate and discharge chamber

Ток верхнего магнита, А Current of top magnet, A	Ток нижнего магнита, А Current of bottom magnet, A	Магнитное поле в плоскости подложки, Гс Magnetic field in substrate area, Gs	Магнитное поле в нижней части газоразрядной камеры, Гс Magnetic field at bottom of discharge chamber, Gs
5	5	42	78
7	5	45	107
10	4	42	150
1	6	42	20

ной на взаимном влиянии двух типов разрядов, которое обеспечивает увеличение плотности плазмы и концентрации распыляемых атомов. Оптимальной конструкцией 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 разрядной камере – слабо расходящееся магнитное поле.

Предложенная конфигурация установки обеспечивает эффективное управление структурой тонкопленочных покрытий, что весьма полезно в различных приложениях. Так например, при изготовлении тонкопленочных аккумуляторных слоев для увеличения энергоемкости особенно важно иметь развитую структуру покрытий.

На рис.2 показана структура анодных пленок на основе нанокompозитов кремния, полученных при магнетронном распылении кремневой мишени с содержанием 10% алюминия, при отключении и при применении бомбардировки растущих пленок потоком ускоренных ионов аргона от геликонного источника. Из иллюстрации видно, что воздействие плазмы ассистирующего геликонного разряда на растущую пленку приводит к кардинальному изменению ее структуры.

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

the RF generator with an operating frequency of 13.56 MHz and output power of up to 1000 W. The RF generator is used for excitation and sustaining of the magnetron discharge.

The results of the study parameters of the helicon plasma source showed the promise of the chosen design of the GPS based on mutual influence of two types of discharges, which ensures an increase in plasma density and concentration of sputtering atoms. The optimal design includes a double-chamber inductive source with solenoidal antenna and a magnetic system, allowing to create

in the process chamber a uniform magnetic field with induction of not less than 7 mT, and in the discharge chamber – a slightly diverging magnetic field.

The proposed configuration provides effective control of structure of thin-film coatings, which is very useful in various applications. For example, in the manufacture of thin-film battery layers it is particularly important to have a well-developed structure of the coatings for increasing the energy capacity.

Fig.2 shows the structure of anodic films based on silicon nanocomposites, which are obtained by

magnetron sputtering of a silicon target containing 10% of aluminum, with and without bombardment of the growing films by the flow of accelerated ions of argon from the helicon source. The illustration shows that the impact of the plasma of assisted helicon discharge leads to a fundamental change of the structure of growing film. ■

The project is executed at financial support of the Ministry of education and science of the Russian Federation. Agreement No. 14.576.21.0021 from 30 June 2014. The unique identifier of applied research (project) RFMEFI57614X0021.

Рис.2. Поверхностная структура пленок двухкомпонентного покрытия Si-Al (10%), полученных при работе только магнетронного источника (а) и при одновременной работе магнетронного и ассистирующего геликонного источников (б)

Fig.2. Surface structure of two-component coating Si-Al (10%), deposited with use of only magnetron source (a) and at simultaneous operation of magnetron and assisted helicon sources (b)

ЛИТЕРАТУРА

1. Кралькина Е.А. Индуктивный высокочастотный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе // УФН. 2008. Т. 178. № 5. С. 519–540.
2. Александров А., Петров А., Вавилин К., Кралькина Е., Неклюдова П., Никонов А., Павлов В., 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.
3. Aleksandrov A.F., Petrov A.K., Vavilin K.V., Kralkina E.A., Neklyudova P.A., Nikonov A.M., Pavlov V.B., Ayrapetov A.A., Odinokov V.V., Sologub V.A., Pavlov G.Ya. Investigation of the Helicon Discharge Plasma Parameters in a Hybrid RF Plasma System // Plasma Physics Reports. March 2016. Vol. 42. № 3. P. 290–292.

ОФТАЛЬМОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ VISIONIX БУДЕТ ВЫПУСКАТЬСЯ В ТРОИЦКЕ

Нанотехнологический центр "Техноспарк" создаст на своей площадке в Троицке производство диагностических офтальмологических приборов марки Visionix совместно с международным концерном Luneau Technology Operations (LTO). Об этом представители компаний объявили на международной выставке "Здравоохранение 2016" в Москве.

"В настоящее время российский рынок медицинских приборов крайне зависим от импорта, а существующие примеры локализации производства иностранного оборудования предусматривают, в основном, лишь "отверточную" сборку. Наша задача при производстве оборудования LTO – добиться полноценной локализации, в том числе за счет увеличения количества российских комплектующих, – заявил гендиректор наноцентра "Техноспарк" Денис

Ковалевич. – Полной локализации производства в России мы намерены добиться в срок до трех лет".

Французская компания LTO разрабатывает и производит широкий спектр офтальмологических приборов под маркой Visionix: авторефрактометры, линзметры, фороптеры и другое оборудование, необходимое для диагностики глаукомы, катаракты, патологий роговицы, для высокоточных измерений оптических свойств глаза и индивидуального подбора линз. Приборы подобного типа в настоящее время в России не изготавливаются и поставляются только из-за рубежа.

В наноцентре "Техноспарк" уже около трех лет производятся все основные компоненты отечественного лазерного хирургического офтальмологического оборудования, и он обладает необходимыми компетенциями для создания производства диагностического оборудования совместно с LTO.

Участники проекта намерены инвестировать в создание новой совместной компании "Визионикс Рус", которая будет заниматься локализацией производства офтальмологического оборудования, осуществлять его продажу и поддержку на российском и международном рынках. Контрактное производство и сборку медицинского оборудования возьмет на себя проектная компания наноцентра "Медика".

Как ожидается, проект будет запущен уже в начале 2017 года.

РОСНАНО