



# УСТАНОВКА МАГнетРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ "МАГНА ТМ 7" В ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ГИС СВЧ MAGNA TM 7 MAGNETRON SPUTTERING SYSTEM IN CREATION OF THIN-FILM MICROWAVE HYBRID ICs

УДК 621.3.049.76.002.5, ВАК 05.04.06, DOI: 10.22184/1993-8578.2017.72.2.80.86

Р.Каракулов<sup>1</sup>, В.Одинок<sup>1</sup>, В.Панин<sup>1</sup>, А.Шубников<sup>1</sup>, Д.Владимиров<sup>2</sup>, С.Владимиров<sup>2</sup>, А.Голубцов<sup>2</sup> / [vodinokov@niitm.ru](mailto:vodinokov@niitm.ru)  
R.Karakulov<sup>1</sup>, V.Odinokov<sup>1</sup>, V.Panin<sup>1</sup>, A.Shubnikov<sup>1</sup>, D.Vladimirov<sup>2</sup>, S.Vladimirov<sup>2</sup>, A.Golubtsov<sup>2</sup>

Представлена новая разработка ОАО "НИИ точного машиностроения" – вакуумная установка "Магна ТМ 7". Рассмотрены ее устройство и принцип работы. На установке получены тонкие резистивные пленки на прямоугольных поликорковых пластинах ВК-100-1 магнетронным распылением дисковых мишеней диаметром 100 мм из материалов РС3710 и РС5406. Четырехзондовым методом установлено, что значения удельного поверхностного сопротивления полученных пленочных резисторов могут достигать 100 Ом/кв с разбросом по пластине не более  $\pm 3,5\%$ .

The new vacuum system Magna TM 7 developed at Research Institute of Precision Machine Manufacturing is described. Its structure and principle of operation are considered. This system was used for magnetron sputtering deposition of resistive coatings on rectangular wafers of VK-100-1 from 100 mm circular targets of RS3710 and RS5406. By four-probe measurements it was found that specific surface resistance of coatings can achieve 100  $\Omega$ /square with dispersion not more than  $\pm 3.5\%$ .

**В** настоящее время микроэлектронные устройства, изготовленные с использованием гибридных интегральных схем сверхвысокочастотного диапазона (ГИС СВЧ), в большой степени определяют техническую и экономическую эффективность приемопередающих систем цифровой радиосвязи, радиолокации и радионавигации. Внедрение тонкопленочной технологии в процесс изготовления ГИС СВЧ позволяет уменьшить размеры, а также улучшить параметры качества получаемых пассивных элементов.

Для создания тонкопленочных резисторов важны следующие характеристики пленки резистивного материала:

- удельное сопротивление пленки, его воспроизводимость и стабильность во времени;
- удельная рассеиваемая мощность пленки;
- температурный коэффициент сопротивления (ТКС);
- эксплуатационные характеристики (спектр и уровень шумов и др.).

Важной задачей является создание отечественного надежного специального технологического оборудования (СТО), которое смогло бы обеспечить требуемое качество получаемых пленочных резисторов и позволило работать в автоматическом режиме с контролем всех параметров технологического процесса нанесения на всех его стадиях. В настоящей статье приведены основные сведения о конструкции и технологических возможностях новой отечественной установки "Магна ТМ 7", предназначенной для вакуумного нанесения многослойных проводящих и резистивных тонких пленок методом магнетронного распыления.

На рис.1 представлены внешний вид установки (а) и ее принципиальная схема (б). Установка состоит из технологического модуля, а также стойки питания и управления. В состав технологического модуля (рис.2) входит рабочая камера 4, которая закреплена на каркасе 1, собранном из алюминиевых профилей. Камера с внутренним диаметром 380 мм и высотой 230 мм изготовлена

<sup>1</sup> ОАО "НИИ точного машиностроения" (ОАО НИИТМ) / Research Institute of Precision Machine Manufacturing (NIITM).

<sup>2</sup> АО "НПО "Лианозовский электромеханический завод" / Lianozovo Electromechanical Plant.

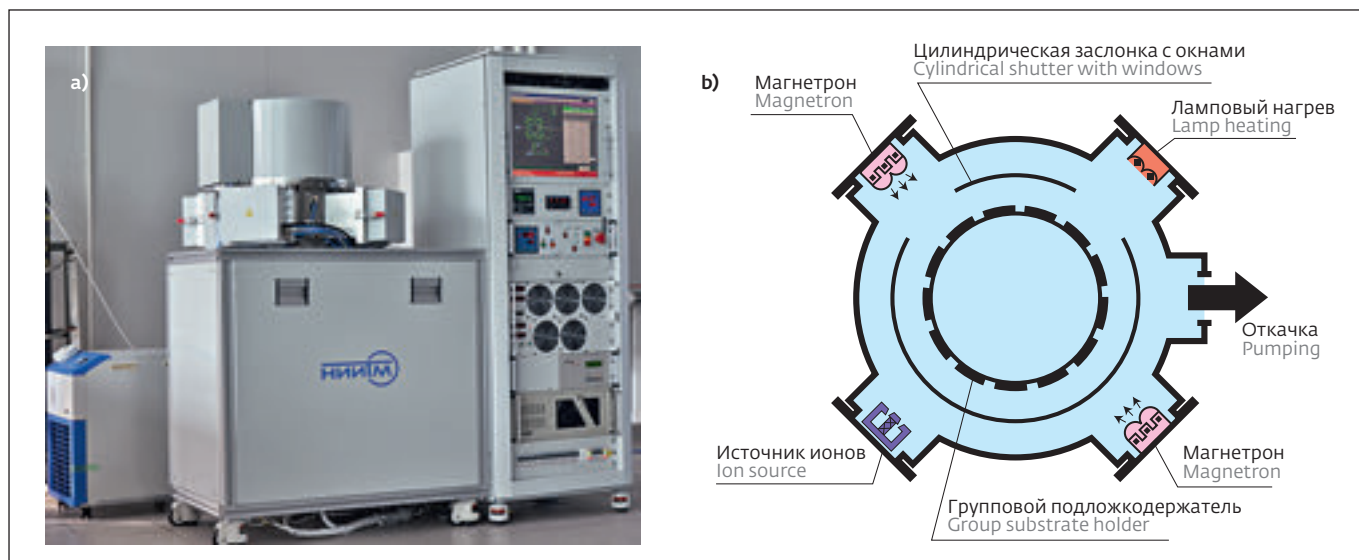


Рис.1. Внешний вид установки "Магна ТМ 7" (а) и ее принципиальная схема (б)  
 Fig.1. Appearance of Magna TM 7 system (a) and its schematic diagram (b)

The microelectronic devices manufactured using microwave hybrid integrated circuits (MW HIC) to a large extent determine the technical and economic efficiency of transmitter-receiver systems for digital radio communication, radar and navigation. The introduction of thin film technology in the production of MW HIC allows to reduce the size and to improve the quality of the passive elements.

The following characteristics of a film of resistive material are important for creation of thin-film resistors:

- resistivity of the film, its reproducibility and stability in time;
- specific power dissipation of the film;
- temperature coefficient of resistance (TCR);
- performance specifications (noise spectrum and level, etc.).

An important task is creation of the domestic reliable special process equipment, which could provide the required quality of film resistors and allow to operate in automatic mode with control of all parameters at all

stages of the deposition process. This article provides basic information about the design and technological capabilities of the new Magna TM 7 system designed for vacuum deposition of multilayer conductive and resistive thin films by magnetron sputtering.

Fig.1 shows an appearance of the system (a) and its schematic diagram (b). The system consists of the process unit and the power and control rack. Process unit (Fig.2) includes a working chamber 4, which is fixed on the frame 1, assembled of aluminum profiles. Chamber with an internal diameter of 380 mm and a height of 230 mm is made of stainless steel and has cooling channels for hot elements. Four flanges for installation of the various autonomous process devices are located on the generatrix of the chamber. In this version of the system, a heating lamp (not shown), ion source (IS) 3, and two magnetrons 2 and 5 are used for the magnetron sputtering deposition of the thin resistive films.

The system operates as follows. Seventeen wafers with a size of  $48 \times 60 \times 2$  mm are fixed on the substrate holder (Fig.3a), which is attached to the upper flange of the vacuum chamber and provided with a motor reducer that ensures smooth rotation of the wafers with a frequency of up to 20 rpm. A lifting mechanism is used for easy loading and unloading of samples (Fig.3b). At first, electric drive lifts the substrate holder over the vacuum chamber, at a distance of 1200 mm from the floor level, and then, manually, using a rotary mechanism, it is led away from the vacuum chamber on distance convenient for loading or unloading of the wafers.

Before loading of the wafers, the working chamber is filled with inert gas, such as an atomic nitrogen  $N_2$ , through puffing valve with electromagnetic control. A throttling valve with manual adjustment is used for regulation of flow.

After loading of the wafers, the working chamber is vacuumized using the vacuum system, which consists of the backing scroll pump

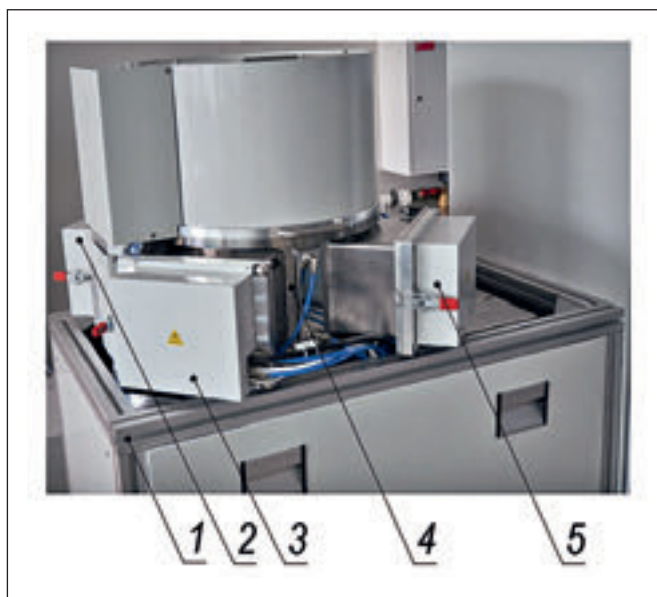


Рис.2. Общий вид технологического модуля установки "Магна ТМ 7": 1 – каркас; 2 – МРУ; 3 – ИИ; 4 – вакуумная камера; 5 – МРУ

Fig.2. General view of process unit of Magna TM 7: 1 – frame; 2 – magnetron; 3 – ion source; 4 – vacuum chamber; 5 – magnetron

из нержавеющей стали и имеет каналы охлаждения греющихся элементов. По образующей камеры расположены четыре фланца для закрепления различных автономных технологических устройств. Для нанесения магнетронным распылением тонких резистивных пленок в данной версии установки применяются ламповый нагрев (не показан),

located in the vicinity of the process unit. The vacuum system also includes high vacuum valve with the possibility of throttling the pumped volume, the turbopump and pneumatic controlled vacuum valves with a bellows seal located near the working chamber.

Different gauges are used for controlling the residual pressure, operating pressure, pressure at the outlet nozzle of the turbopump. Dry vacuum system provides a residual pressure in the working chamber better than  $5 \cdot 10^{-4}$  Pa, 30 min after the operation of the turbopump at full capacity. To reduce the process time, the heater is switched on at

a vacuum of  $8 \cdot 10^{-3}$  Pa, 10 min after the start of vacuumizing. The lamp heater (Fig.4a), which is composed of four halogen lamps with a capacity of 0.5 kW each, is used for heating the wafers. Power is supplied to the heaters through a vacuum electrical input from the heating control unit. The thermal resistance sensor registers the pre-heating of the wafers to  $100^\circ\text{C}$ , and in the process of deposition and subsequent annealing the heating reaches  $300^\circ\text{C}$ . The objective of preheating is the removal of residual water vapor from the wafers. After that, the wafers are subjected to ion bombardment for removal of various impurities to improve the

источник ионов (ИИ) 3, а также два магнетронных распылительных устройства (МРУ) 2 и 5.

Установка работает следующим образом. Семнадцать пластин размером  $48 \times 60 \times 2$  мм закрепляют на подложкодержателе (рис.3а), который пристыковывается к верхнему фланцу вакуумной камеры и снабжен мотор-редуктором, обеспечивающим плавное вращение пластин с частотой до 20 об/мин. Для удобства загрузки и выгрузки образцов применяется механизм подъема (рис.3б). Сначала электрический привод поднимает подложкодержатель над вакуумной камерой на расстояние 1200 мм от уровня пола, а затем вручную, с помощью поворотного механизма, он отводится от вакуумной камеры на удобное для загрузки или выгрузки пластин расстояние.

Перед загрузкой пластин происходит напуск инертного газа, например атомарного азота  $\text{N}_2$ , в рабочую камеру при помощи клапана напуска с электромагнитным управлением. Для регулирования потока применяется дросселирующий клапан с ручной подстройкой.

После загрузки пластин рабочая камера откачивается с помощью вакуумной системы, которая состоит из форвакуумного спирального насоса, расположенного в непосредственной близости от технологического модуля. Также в состав вакуумной системы входят высоковакуумный затвор с возможностью дросселирования откачиваемого объема, турбомолекулярный насос и пневмоуправляемые вакуумные клапаны с сильфонным уплотнением, расположенные рядом с рабочей камерой.

adhesion strength of thin films with the surface of the samples. For pre-cleaning of substrates is used having a rectangular aperture of the ion source (Fig.4b) with a closed electron drift with supply of positive high voltage potential up to 3 kV to the anode from the power supply. The ion source (Fig.4b) with closed electron drift, having a rectangular aperture, with applying a positive high voltage potential up to 3 kV to the anode from the power supply is used for the pre-cleaning of substrates. Central and peripheral pole tips of IS, as well as the case have a grounded potential. The magnetic system is assembled from separate

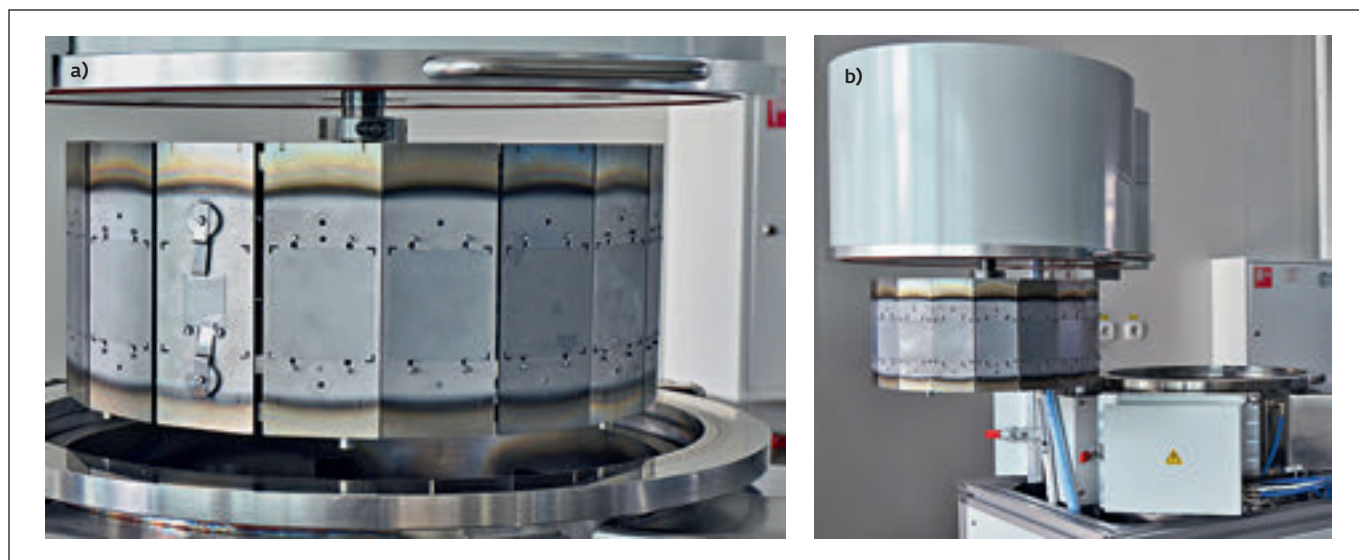


Рис.3. Подложкодержатель (а) и его подъемный механизм (b)  
 Fig.3. Substrate holder (a) and lift mechanism (b)

Для контроля остаточного давления, рабочего давления, давления на выходном патрубке турбомолекулярного насоса применяются различные вакуумметры. Безмасляная вакуумная система обеспечивает остаточное давление в рабочей камере не хуже  $5 \cdot 10^{-4}$  Па через 30 мин после выхода турбомолекулярного насоса на рабочий режим. Для сокращения времени технологического цикла нагреватель включается при достижении вакуума  $8 \cdot 10^{-3}$  Па через 10 мин после начала вакуумирования. Для нагрева пластин применяется ламповый нагреватель

(рис.4а), в состав которого входят четыре галогенные лампы мощностью по 0,5 кВт каждая. Питание на нагреватели подается через вакуумный электрический ввод от блока управления нагревом. Датчик термосопротивления фиксирует предварительный нагрев пластин до  $100^\circ\text{C}$ , а в процессе нанесения покрытий и последующего отжига нагрев достигает  $300^\circ\text{C}$ . Задача предварительного нагрева – удаление остаточных паров воды с пластин. После этого пластины подвергаются ионной бомбардировке для удаления с них различных загрязнений

cylinders with size of  $20 \times 40$  mm, made of neodymium-iron-boron alloy. All elements are water cooled to prevent overheating and failure of the IS.

One of the two magnetrons is switched on after the pre- (finish) treatment for a short period of time, to clean the target from contamination. All elements inside the chamber are protected from the flow of sputtered material during target training using the shutter attached to the rotational drive, which is attached to the lower flange of the working chamber and opens the devices according to the sequence of processing (Fig.5a). The

planar magnetron sputtering systems (Fig.5b) with circular targets with a diameter of 100 mm and a thickness of 6 mm are used for generating the flow of the deposited substance. The targets are clamped to a water-cooled base, made of copper, through the indium gasket. The magnetic system is assembled from magnets of rectangular cross section, made of neodymium-iron-boron alloy. The magnetic circuit made of carbon steel is used for closing the magnetic field. Magnets with a magnetic core are placed in an aluminium alloy case, which is washed with water. Using the tesla meter, it was found that

the induction of magnetic field on the surface of the target is 0.1 T. Magnetrons are equipped with protective screens for stable burning of the discharge and to protect the internal chamber space from the dust.

A DC unit with output power up to 3 kW and a maximum current of 7 A is used to power the magnetrons. The unit has a power output connector that is galvanically isolated from the case. A potential of negative polarity of up to 650 V is applied to the target for deposition of thin films, and the ignition of discharge occurs at voltages of up to 1200 V. A switching power device is



Рис.4. Ламповый нагреватель (а) и ионный источник (б)  
Fig.4. Lamp heater (a) and ion source (b)

с целью повысить прочность сцепления тонких пленок с поверхностью образцов. Для предварительной очистки подложек применяется имеющий прямоугольную апертуру источник ионов (рис.4б) с замкнутым дрейфом электронов с подачей положительного высоковольтного потенциала до 3 кВ на анод от блока питания. Центральный и периферийный полюсные наконечники ИИ, а также корпус имеет заземленный потенциал. Магнитная система набирается из отдельных цилиндров размером 20×40 мм, изготовленных из сплава системы неодим – железо – бор.

Все элементы охлаждаются водой для предотвращения перегрева и выхода ИИ из строя.

После предварительной (финишной) обработки включается одно из двух магнетронных распылительных устройств, и в течение короткого промежутка времени производится очистка мишени от загрязнений. Все элементы внутри камеры защищены от потока материала, распыляемого при тренировке мишени, с помощью заслонки, присоединенной к приводу вращения, который пристыковывается к нижнему фланцу рабочей камеры и открывает устройства

used to switch power between the magnetrons.

The valve opens the prepared target of one of magnetrons and the lamp heater, and the target material is deposited on the wafers with their simultaneous heating. The latter increases the adhesion strength of the target material with the surface atoms of the samples and allows to adjust the structure of the deposited thin films and, accordingly, their surface resistivity. A witness wafer is used for the control of temperature and specific surface resistance of the samples during the deposition. Deposition is performed until the specific surface resistance

on the witness wafer will not exceed 100 Ω.

The use of two magnetrons in the Magna TM 7 allows to combine deposited materials and to deposit multilayer thin films during one cycle of vacuuming. Then an annealing of the wafers for 30 min at temperatures of up to 300 °C is conducted for crystallization of structure of the formed resistive coatings. After completion of the process the chamber is filled with inert gas, and the wafers are unloaded.

The facility is equipped with compressed air supply system. Pneumatic panel has an air

preparation unit or dehumidifier, pressure gauge for control of input pressure and electronic distribution device for supplying compressed air to the required pneumatic controlled actuators.

The system of cooling water supply to the heating elements includes a special header that provides multiple channels of supply. Hydro-panel has a sensor to monitor the input pressure and an electronic device for controlling the flow of water and its output temperature on each channel.

The gas system is equipped with three channels for the supply of gases with flow regulators on each

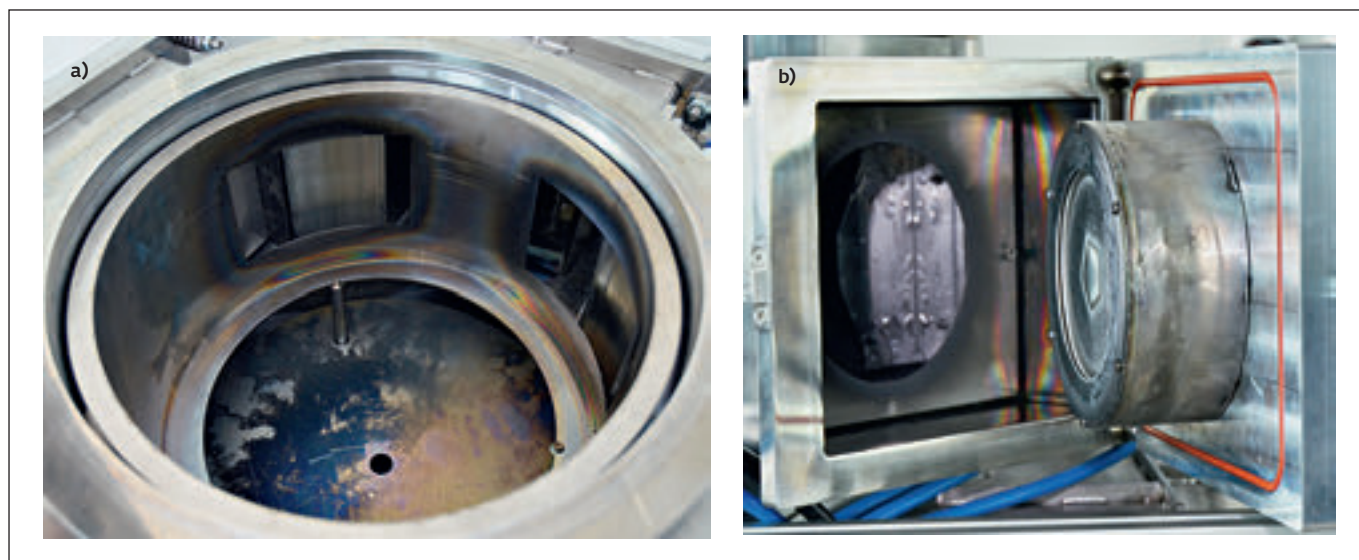


Рис.5. Заслонка (а) и магнетронное распылительное устройство (b)  
 Fig.5. Shutter (a) and magnetron (b)

согласно очередности выполнения технологических операций (рис.5а). Для генерации осаждаемого потока вещества применяются планарные магнетронные распылительные системы (рис.5b) с дисковыми мишенями диаметром 100 мм и толщиной 6 мм. Мишени прижимаются к водоохлаждаемому основанию, изготовленному из меди, через индиевую прокладку. Магнитная система набирается из магнитов прямоугольного сечения, изготовленных из сплава на основе неодим - железо - бор. Для замыкания магнитного поля применяется магнитопровод, изготовленный

из углеродистой стали. Магниты с магнитопроводом помещаются в корпус из алюминиевого сплава, который омывается водой. С помощью тесламетра установлено, что величина индукции магнитного поля на поверхности мишени составляет до 0,1 Тл. Магнетроны снабжены защитными экранами для стабильного горения разряда и защиты внутрикамерного пространства от запыления.

Для питания МРУ используется блок постоянного тока с выходной мощностью до 3 кВт и максимальным током до 7 А. В блоке имеется гальванически

of them. The argon is fed through the first channel, the second channel is designed to feed oxygen into the ion source, and the third channel is aimed to feed an inert gas into the working chamber at the beginning or at the end of the process.

The power supply and control rack comprises ion source power supply, magnetron power supply, heating control unit, as well as various switching elements. The operator controls the process via the display, a computer mouse and keyboard in manual or semiautomatic modes. An industrial computer is used for processing data from sensors and generating control signals. In the

case of emergencies and power outages, the operation of control system will be supported by uninterruptible power supply. The turbopump controller is also installed here.

The Magna TM 7 was used for deposition of thin film resistors using circular targets of resistive alloys RS3710 and RS5406 on 60×48 mm rectangular wafers of VK-100-1 with a thickness from 0.5 to 2 mm. The process was carried out at operating pressure of argon of 0.1–1.0 Pa, the sputtering power for each target from 1.5 to 3 kW and heating temperature up to 300 °C. By four-probe measurements it was found that specific surface resistance

of the obtained film resistors can achieve 100 Ω/square with dispersion not more than ±3.5%.

This considered system allows to deposit thin film resistors in the production of MW HIC using magnetron sputtering. The location of the wafers on the substrate holder in the vertical plane ensures the deposition of high-quality thin films with good adhesion strength between substrate and adhesive layer. Automated control system of Magna TM 7 monitors all process parameters and supports their stability according to a settings providing a good reproducibility of the properties of the deposited coating. ■



изолированный от корпуса выходной силовой разъем. При нанесении тонких покрытий на мишень подается высокий потенциал отрицательной полярности до 650 В, а поджиг разряда происходит при напряжении до 1200 В. Для переключения питания между магнетронами применяется устройство для коммутации мощности.

Заслонка открывает подготовленную мишень одного из магнетронов, а также ламповый нагреватель, и происходит напыление материала мишени на пластины с одновременным их нагревом. Последний повышает прочность сцепления материала мишени с поверхностными атомами образцов и позволяет регулировать структуру напыляемых тонких пленок и, соответственно, их удельное поверхностное сопротивление. Во время процесса напыления контроль температуры и удельного поверхностного сопротивления образцов происходит по пластине-свидетелю. Напыление производится пока значение удельного поверхностного сопротивления на пластине-свидетеле не превысит 100 Ом.

В установке "Магна ТМ 7" предусмотрены два МРУ, что позволяет комбинировать напыляемые материалы и наносить многослойные тонкие пленки за один цикл вакуумирования. Затем выполняется отжиг пластин в течение 30 мин при температуре до 300 °С для кристаллизации структуры сформированных резистивных покрытий. После завершения технологического процесса осуществляется напуск инертного газа, и пластины выгружаются из вакуумной камеры.

Установка снабжена системой подачи сжатого воздуха. Пневмопанель имеет блок подготовки воздуха или осушитель, манометр для контроля входного давления, а также распределительное электронное устройство для подачи сжатого воздуха на требуемые исполнительные пневмоуправляемые элементы.

Система подачи охлаждающей воды на греющиеся элементы включает специальный коллектор, обеспечивающий несколько каналов подачи. Гидропанель имеет датчик для контроля входного давления и электронное устройство для контроля расхода воды и ее температуры на выходе по каждому каналу.

Газовая система установки снабжена тремя каналами подачи газов с регуляторами расхода на каждом из них. Аргон подается через первый канал, второй канал предназначен для подачи кислорода в ионный источник, а по третьему каналу происходит подача инертного газа для напуска в рабочую камеру в начале или по окончании технологического процесса.

Стойка питания и управления содержит блок питания ионного источника, блок питания магнетрона распыления, блок управления нагревом, а также различные коммутационные элементы. Управление

технологическим процессом осуществляется оператором с помощью дисплея, компьютерной мыши и клавиатуры в ручном или полуавтоматическом режиме. Для обработки данных, поступающих с датчиков, и выдачи управляющих сигналов применяется промышленный компьютер. В случае аварийных ситуаций и отключения питания работа системы управления будет поддерживаться источником бесперебойного питания. Здесь же установлен контроллер турбомолекулярного насоса.

На установке "Магна ТМ 7" проводилось напыление тонкопленочных резисторов с использованием мишеней, изготовленных из резистивных сплавов РС-5406 и РС-3710, на прямоугольные пластины из поликора ВК-100-1 размером 60×48 мм и толщиной от 0,5 до 2 мм. Процессы проводились при рабочем давлении аргона 0,1-1,0 Па, мощности распыления каждой мишени в диапазоне 1,5-3 кВт и температуре нагрева до 300 °С. С помощью четырехзондового метода установлено, что значения удельного поверхностного сопротивления полученных пленочных резисторов могут достигать 100 Ом/кв с разбросом по пластине не более ±3,5%.

Рассмотренная установка позволяет напылять тонкопленочные резисторы в производстве ГИС СВЧ магнетронным распылением. Расположение пластин на подложкодержателе в вертикальной плоскости обеспечивает нанесение качественных (с минимальной дефектностью) тонких пленок, обладающих хорошей прочностью сцепления между основой и адгезионным слоем. Автоматизированная система управления установки "Магна ТМ 7" контролирует все параметры процесса и поддерживает их стабильность согласно установленным значениям, обеспечивая хорошую воспроизводимость свойств наносимых покрытий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Данилина Т.И. Технология тонкопленочных микросхем. Учебное пособие. Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2006. 164 с.
2. Бушминский И.П., Морозов Г.В. Технология гибридных интегральных схем СВЧ. М.: Высшая школа, 1980. 285 с.
3. Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Метель А.С., Панин В.В. Заполнение рабочей камеры технологической установки однородной плазмой с помощью стационарного тлеющего разряда // Физика плазмы. 2009. Т. 35. №12. С. 1140-1149.
4. Одинокоев В.В., Панфилов Ю.П. Выбор типа вакуумного нанотехнологического оборудования по критерию заданной производительности // Наноинженерия. 2011. №11. С. 7-18.