



УДК 621.382, ВАК 05.27.01

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.615.623

ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОТРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЙ НА ПЛАСТИНАХ Ø200 мм С ТОПОЛОГИЧЕСКИМИ РАЗМЕРАМИ УРОВНЯ 180–65 нм VACUUM-PLASMA PROCESSES AND EXPERIMENTAL EQUIPMENT FOR OPTIMIZING TECHNOLOGIES ON Ø200 mm PLATES WITH TOPOLOGICAL DIMENSIONS OF 180–65 NANOMETERS LEVEL

БИРЮКОВ МИХАИЛ ГЕОРГИЕВИЧ

BIRYUKOV MIKHAIL G.

ОДИНОКОВ ВАДИМ ВАСИЛЬЕВИЧ

ODINOKOV VADIM V.

vodinokov@niitm.ru

vodinokov@niitm.ru

ОАО «Научно-исследовательский институт точного
машиностроения»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10

Reasearch Institute of Precision Machine Manufacturing
(NIITM) JSC
10 Panfilovsky Ave., Zelenograd, Moscow, 124460

Рассмотрены актуальные вакуумно-плазменные процессы и экспериментальное оборудование: атомно-слоевое осаждение, плазмохимическое травление, формирование мелкощелевой изоляции и очистка поверхности пластин.
Ключевые слова: вакуумно-плазменные процессы; мелкощелевая изоляция; плазмохимическое травление; атомно-слоевое осаждение.

The paper highlights current vacuum-plasma processes and experimental equipment, such as atomic-layer deposition, plasma-chemical etching, shallow trench isolation technique and wafer stripping.

Keywords: vacuum-plasma processes; fine-gap insulation; plasma-chemical etching; atomic-layer deposition.

ОАО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения» освоило новые вакуумно-плазменные технологические процессы и разработало экспериментальное автоматизированное оборудование для производства изделий микроэлектроники.

АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ

Согласно дорожной карте развития микроэлектроники к 2020 году минимальный характерный размер топологии интегральных микросхем будет достигать 5–10 нм, а формируемые тонкопленочные покрытия должны обладать комплексом свойств, обеспечивающих надежность работы полупроводниковых устройств. Существующее технологическое оборудование для формирования тонкопленочных покрытий вакуумно-плазменными методами (PVD и CVD) не обеспечивает требуемые параметры качества формируемых сверхтонких пленок.

Атомно-слоевое осаждение (АСО) позволяет создавать тонкие пленки нанометровой толщины. Кроме того, сверхтонкие покрытия, полученные по методу АСО, обладают рядом уникальных характеристик (конформность, сплошность, стехиометрия), которые способствуют их применению, например, в следующих отраслях:

- микроэлектроника (подзатворные диэлектрики с высоким k , металлические слои затворного электрода, затравочные и барьерные слои в технологии сквозных отверстий TSV и т.д.);
- солнечная энергетика (пассивирующий слой, проводящие оксиды, промежуточные многослойные многокомпонентные структуры и т.д.);

- производство твердотельных топливных элементов (анодные слои, слои электролита, катодные слои и т.д.);
- машиностроение (коррозионностойкие покрытия, пары трения и т.д.);
- медицина (биосовместимые покрытия для имплантов).

АСО реализуется в виде повторно-циклируемой химической реакции с последовательной адсорбцией на подложке двух реагентов — прекурсоров, продукт взаимодействия которых формирует пленку диэлектрика либо металла. В АСО фазы сорбции прекурсоров и собственно реакции между прекурсорами перемежаются продувкой инертным газом и откачкой объема реактора для удаления излишков прекурсоров и газообразных продуктов реакции. Ростовой процесс в каждом цикле самоограничивается толщиной в точности одного монослоя выращиваемой пленки. Схематически фазы атомно-слоевого цикла показаны на рис. 1. На рис. 2 показаны примеры химических процессов, протекающих на поверхности образца при осаждении пленок оксида алюминия Al_2O_3 , оксида титана TiO_2 и оксида цинка ZnO .

Преимуществом метода атомно-слоевого осаждения является хорошее управление стехиометрическим составом наносимых пленок с высокой степенью однородности по площади пластины. Их толщина контролируется в процессе роста с точностью до одного мономолекулярного слоя. Температура пластины в процессе нанесения пленки не превышает $300^\circ C$. Однако скорость осаждения оказывается существенно ниже, чем при использовании других методов, что ограничивает применение АСО только задачами прецизионного нанесения сверхтонких пленок.



Схема процесса | The Process Scheme

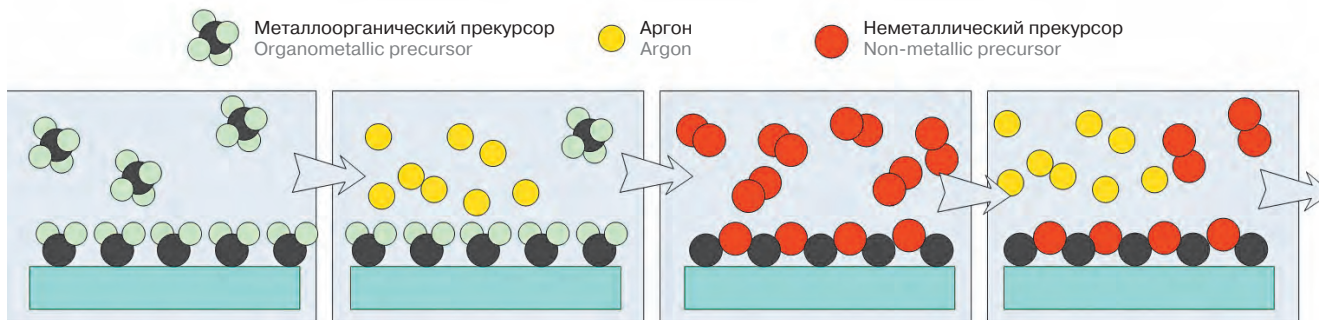


Рис. 1. Схематическое представление последовательности поверхностных реакций, формирующих один цикл АСО

Fig. 1. Schematic representation of sequence of surface reactions that form one cycle of ALD

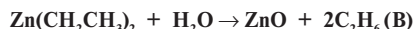
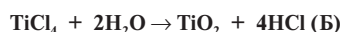
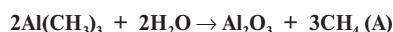


Рис. 2. Химические реакции, протекающие на поверхности образцов при атомно-слоевом осаждении сверхтонких пленок оксида алюминия Al_2O_3 (А), оксида титана TiO_2 (Б) и оксида цинка ZnO (В)

Fig. 2. Chemical reactions on the samples surface during atomic-layer deposition of ultrathin films: Al_2O_3 (A) alumina, TiO_2 (B) titanium oxide and ZnO (C) zinc oxide

Для повышения производительности процесса АСО применяется удаленный источник плазмы на основе индуктивно-связанного ВЧ газового разряда. Технологические газы, проходя через область горения разряда, разлагаются на радикалы, которые участвуют в формировании пленок на поверхности образцов. Чтобы плазма в источнике не оказывала радиационного

воздействия на образцы и не повреждала структуру пленок, выходная апертура источника удалена от реактора на значительное расстояние и отделена от него быстродействующим вакуумным затвором.

Сам по себе процесс АСО имеет довольно простой алгоритм работы, но вот оборудование для его реализации должно оснащаться большим количеством надежных узлов, так как используются воспламеняющиеся и вредные для здоровья химические реактивы, которые необходимо быстро повторно-циклично подавать в реактор.

На рис. 3 и 4 показаны конструкция реактора АСО и схема установки АСО с плазменной активацией и поштучной загрузкой пластин диаметром до 200 мм с помощью шлюзовой камеры. Установка АСО предназначена для проведения низкотемпературного плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения (ПАСО) барьерных, зародышевых слоев в технологиях TSV, получения диэлектрических слоев Al_2O_3 , включая жесткие маски, для осаждения металлических слоев (capping layer), нитрида гафния HfN , нитрида титана, а также осаждения

“Research Institute of Precision Machine Manufacturing” JSC has mastered new vacuum-plasma technological processes and developed industrial automated equipment for serial production of microelectronics devices.

ATOMIC-LAYER DEPOSITION

According to the microelectronics development road map, by 2020 the minimal node size of the integrated circuits topology will be 5–10 nm, and thin-film coatings will have a complex of properties that ensure the reliability of semiconductor devices. The existing process equipment for the formation of thin-film coatings by vacuum-plasma methods (PVD and CVD) does not provide the required quality parameters of the generated ultrathin films.

Atomic-layer deposition (ALD) makes it possible to create thin films of nanometer thickness. In addition, ultrathin coatings obtained by the ALD method have a number of unique characteristics (conformality,

continuity, stoichiometry) that promote their use, for example, in the following industries:

- microelectronics (gate dielectrics with high-k, metal layers of the gate electrode, seed and barrier layers in the TSV technology, etc.);
- solar energy (passivation layer, conductive oxides, intermediate multilayer multicomponent structures, etc.);
- production of solid-state fuel cells (anode layers, electrolyte layers, cathode layers, etc.);
- mechanical engineering (corrosion-resistant coatings, friction pairs, etc.);
- medicine (biocompatible coatings for implants).

ALD is realized in the form of a repeated cycled chemical reaction with sequential adsorption on the substrate of two reagents (precursors), whose interaction product forms a dielectric or a metal film. In ALD, the phases of sorption of precursors and the reaction between them are alternated with blowing an inert gas and pumping out the reactor volume to remove

excess precursors and reaction gases. The growth process in each cycle is self-limited by the thickness of one monolayer of the grown film. Schematically, the phases of the atomic-layer deposition cycle are shown in Fig. 1. Figure 2 shows examples of chemical processes occurring on the surface of a sample during deposition of Al_2O_3 , aluminum oxide films, titanium oxide TiO_2 and zinc oxide ZnO .

The advantage of the ALD method is a good control of the stoichiometric composition of the deposited films with a high degree of homogeneity in the area of the wafer. Their thickness is controlled during growth with an accuracy of up to one monomolecular layer. The temperature of the wafer during the deposition of the film does not exceed 300 °C. However, the rate of deposition is significantly lower than when using other methods, which limits the use of ALD only to the problems of precision deposition of ultrathin films.

To improve the productivity of the ALD process, a remote plasma source is used based

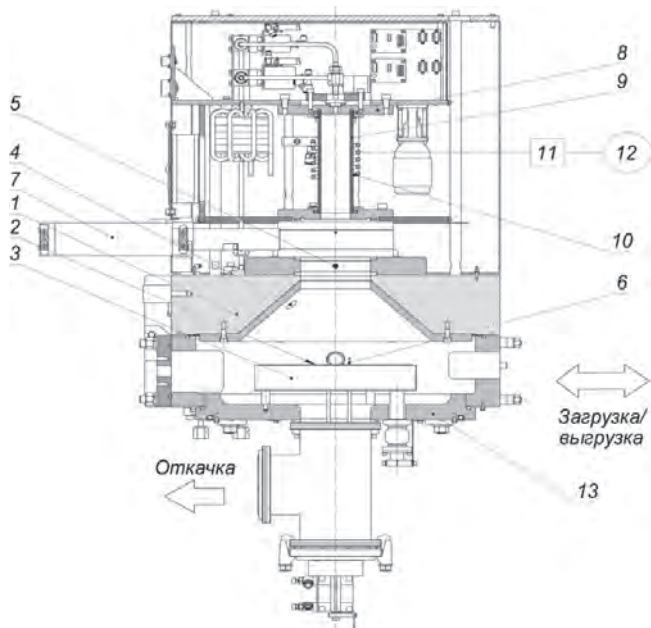


Рис. 3. Конструкция реактора установки АСО (1 — верхняя камера; 2 — кремниевая пластина диаметром 200 мм; 3 — подложкодержатель; 4 — отверстие для подачи прекурсоров; 5 — отверстие для подачи продувочного газа; 6 — механизм вертикального перемещения; 7 — вакуумный клапан; 8 — источник плазмы; 9 — керамическая колба; 10 — индуктор; 11 — согласующее устройство; 12 — ВЧ-генератор; 13 — соединительный фланец подложкодержателя)

Fig. 3. The ALD reactor (1 — the upper chamber; 2 — the silicon wafer with a diameter of 200 mm; 3 — substrate holder; 4 — a hole for the supply of precursors; 5 — aperture for purge gas supply; 6 — mechanism of vertical movement; 7 — the vacuum valve; 8 — source of plasma; 9 — ceramic flask; 10 — inductor; 11 — matching device; 12 — HF generator; 13 — connecting flange of the substrate holder)

on an inductively-coupled RF gas discharge. Process gases passing through the discharge burning region are decomposed into radicals that participate in the formation of films on the surface of the samples. To ensure that the plasma in the source does not have a radiation impact on the samples and does not damage the film structure, the output aperture of the source is removed from the reactor at a considerable distance and is separated from it by a fast-acting vacuum shutter.

The ALD process itself has a fairly simple algorithm of operation, but here the equipment for its implementation must be equipped with a large number of reliable units, since inflammable and harmful chemicals are used, which need to be re-cycled quickly to the reactor.

Figures 3 and 4 show the construction of the ALD reactor and the scheme of the ALD installation with plasma activation and piece loading of wafers with a diameter of up to 200 mm using a loadlock chamber. The ALD installation is designed to conduct low-temperature

plasmastimulated atomic-layer deposition (PALD) of barrier, embryonic layers in TSV technologies, to obtain Al_2O_3 dielectric layers, including hard masks, for deposition of capping layers, hafnium nitride (HfN), titanium nitride, and deposition gate dielectric HfO_2 for a technology with a topological size of 65-45-32 nm, including high-k gate-like ferroelectric and/or ferroelectric dielectrics for operational non-volatile memory of FRAM type (Ferroelectric Random Access Memory), etc. Figure 5 shows the scheme for preparation and supply of precursors. Precursors are chemical reagents whose components react with components on the surface of the samples, as a result of which one molecular layer of the substance and volatile compounds are formed, which are then removed by purging the reactor. Precursors are basically organometallic compounds with different levels of saturated vapor pressure. If the pressure on the surface of the organometallic liquid is less than 133.33 Pa, then such a compound is a low-pressure precursor and

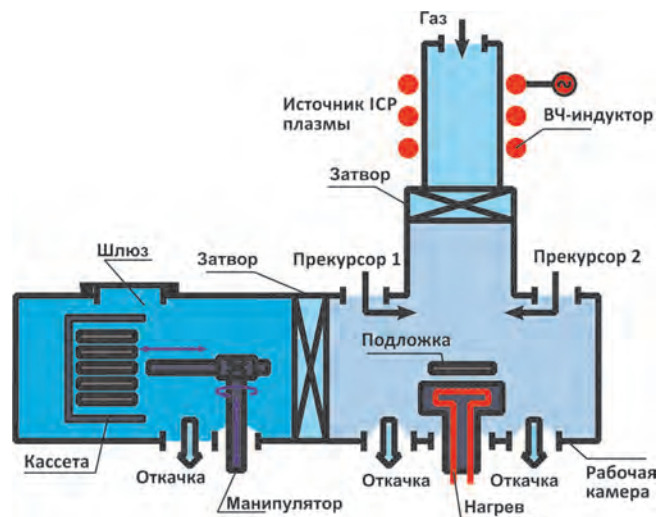


Рис. 4. Схема установки АСО с плазменной активацией и загрузкой пластин диаметром до 200 мм с помощью кассетного загрузчика
Fig. 4. Scheme of ALD system with plasma activation and loading of up to 200 mm wafers using cassette loader

подзатворного диэлектрика HfO_2 для технологии с топологическим размером 65–45–32 нм, в том числе high-k подзатворных ферроэлектрических и/или сегнетоэлектрических диэлектриков для оперативных энергонезависимых ЗУ типа FRAM (Ferroelectric Random Access Memory) и др. На рис. 5 показана схема подготовки и подачи прекурсоров. Прекурсорами называются химические реактивы, компоненты которых реагируют с компонентами на поверхности образцов, в результате чего формируется один молекулярный слой вещества с образованием летучих соединений, которые затем удаляются продувкой реактора. Прекурсорами — в основном металлоорганические соединения с различным уровнем давления насыщенных

it must be applied heated to a temperature from 50 to 80 °C. To feed such a precursor to the reactor, bubbling, that is, pumping an inert gas with a certain flow through a bubbler, in which the precursor is located, should also be performed. If the pressure on the surface of the organometallic liquid is greater than 133.33 Pa, then such a compound is a high-pressure precursor, and it must be cooled to a temperature from 10 to 20 °C for feeding to the reactor. Passage of inert gas through the bubbler in this case is not required.

DEEP ANISOTROPIC ETCHING

According to the forecasts of the IC manufacturers for 2020–2025, the physical dimensions of the minimal CMOS elements will decrease below the threshold of 10 nm. Despite the development of promising tunnel transistors, it becomes clear that geometric limits will soon be reached, so now active studies of three-dimensional structures with the possibility of stacking transistor drainage

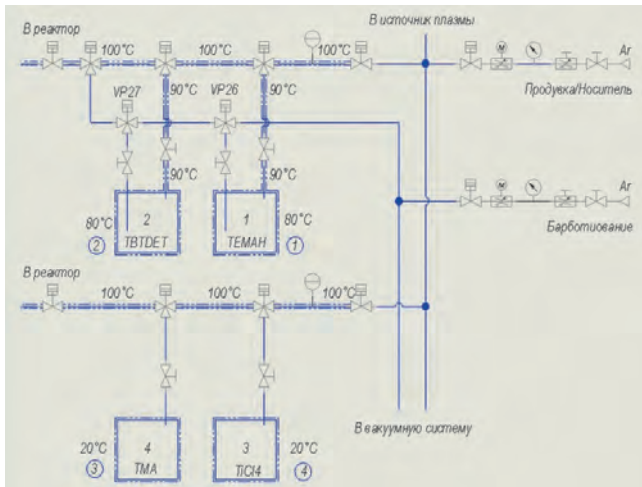


Рис. 5. Схема подготовки и подачи прекурсоров в реактор (1 — барботер с металлоорганическим прекурсором гафния (ТЕМАН) с низким давлением насыщенных паров, 2 — барботер с металлоорганическим прекурсором тантала (ТВТДЕТ) с низким давлением насыщенных паров, 3 — барботер с металлоорганическим прекурсором алюминия (ТМА) с высоким давлением насыщенных паров, 4 — барботер с металлоорганическим прекурсором титана ($TiCl_4$) с высоким давлением насыщенных паров)

Fig. 5. Scheme of preparation and supply of precursors to reactor: 1 — bubbler with organometallic hafnium precursor (ТЕМАН) with low saturated vapor pressure; 2 — bubbler with organometallic tantalum precursor (ТВТДЕТ) with low saturated vapor pressure; 3 — bubbler with organometallic aluminum precursor (ТМА) with high saturated vapor precursor; 4 — bubbler with organometallic titanium precursor ($TiCl_4$) with high saturated vapor pressure

собственных паров. Если давление на поверхности металлоорганической жидкости меньше 133,33 Па, то такое соединение называют прекурсором с низким давлением, его необходимо применять нагретым до температуры от 50 до 80°C. Для подачи такого прекурсора в реактор также следует выполнять барботирование — прокачивать инертный газ с определенным расходом через ампулу (барботер), в которой находится прекурсор.

Таблица 1. Режимы травления отверстий диаметром 13 мкм

Table 1. Etching modes for 13 μm holes

Расход, л/ч Consumption, l/h			Давление, Па Pressure, Pa	Мощность, Вт Capacity, W		Смещение, В Offset, V	Кол-во циклов Number of cycles	Время, с Time, s	
Ar	SF ₆	C ₄ F ₈		Источника плазмы Source of plasma	Столика Stage			SF ₆	C ₄ F ₈
3	6	2,2	9	500	10	30	260	11	4

Таблица 2. Режимы травления щелей шириной 1,5 мкм

Table 2. Modes of etching of 1.5 μm trenches

Расход, л/ч Consumption, l/h			Давление, Па Pressure, Pa	Мощность, Вт Capacity, W		Смещение, В Offset, V	Кол-во циклов Number of cycles	Время, с Time, s	
Ar	SF ₆	C ₄ F ₈		Источника плазмы Source of plasma	Столика Stage			SF ₆	C ₄ F ₈
3,6	4	6	9	600	20	85	60	11	4

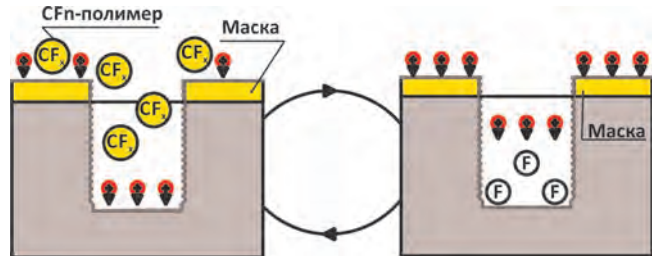


Рис. 6. Схематическое представление последовательности поверхностных реакций, формирующих один цикл Bosch-процесса

Fig. 6. Schematic representation of sequence of surface reactions that form one cycle of Bosch process

Если давление на поверхности металлоорганической жидкости больше 133,33 Па, то такое соединение называют прекурсором с высоким давлением и для подачи в реактор его необходимо охладить до температур от 10 до 20°C. Пропускание инертного газа через барботер в этом случае не требуется.

ГЛУБОКОЕ АНИЗОТРОПНОЕ ТРАВЛЕНИЕ

По прогнозам производителей ИС на годы 2020–2025, физические размеры минимальных элементов КМОП уменьшатся ниже порога 10 нм. Несмотря на разработку перспективных туннельных транзисторов, становится ясно, что скоро будут достигнуты геометрические пределы, поэтому сейчас ведутся активные исследования трехмерных структур с возможностью укладывать стоки транзисторов друг на друга. Такой 3D-подход позволит продолжать наращивать количество компонентов на квадратный миллиметр, даже если горизонтальные физические размеры больше не будут поддаваться дальнейшему масштабированию.

Одна из технологий создания трехмерных систем — глубокое анизотропное травление, которое в наибольшей степени актуально для формирования структур MEMS и TSV, а также DRAM-конденсаторов.

Процесс глубокого анизотропного травления (Bosch-процесс) является двухстадийным и циклическим. На первой стадии (рис. 6) осуществляется быстрое изотропное травление кремния в плазме SF₆-газа, на второй — осаждение полимерной



пленки во фторуглеродной плазме. Эти стадии циклически повторяются. На первой стадии следующего цикла под действием ионной бомбардировки ионами Ar происходит быстрое удаление пассивирующей пленки со дна канавки с последующим удалением кремния. На боковых стенках пассивирующая пленка остается за счет отсутствия ионной компоненты при ее травлении.

Основными преимуществами Bosch-процесса являются контролируемый и стабильный профиль травления, хорошая селективность к маске, высокая скорость травления и высокое аспектное соотношение. Основной недостаток — шероховатость стенок вследствие цикличности травления.

На рис. 7 представлен результат глубокого анизотропного травления отверстий диаметром 13 мкм на глубину 112 мкм при режимах, приведенных в табл. 1. Неравномерность травления по пластине составила $\pm 3,5\%$.

На рис. 8 представлен результат глубокого анизотропного травления щелей шириной 1,5 мкм при режимах, приведенных в табл. 2. Неравномерность травления по пластине составила $\pm 3,5\%$.

На рис. 9 и 10 приведена схема установки глубокого анизотропного травления с поштучной загрузкой пластин диаметром до 200 мм с помощью шлюзовой камеры. Установка предназначена для плазмохимического высокоскоростного анизотропного селективного глубокого травления кремния на базе Bosch-процесса для формирования сквозных отверстий в кремнии (Through Silicon Vias — TSV) для производства, в частности, TSV-интерпозеров для 2,5–3D-микросборок, МЭМС и др.

ФОРМИРОВАНИЕ МЕЛКОЩЕЛЕВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

С развитием нанотехнологии плазмохимическое травление стало практически единственным инструментом для переноса рисунка ИС в маскирующем слое в материал подложки. Кроме того, важным этапом формирования ИС является изготовление изоляции элементов в кремниевой подложке. После того как полупроводниковая промышленность достигла критического размера 0,25 мкм, стала применяться технология мелкощелевой изоляции элементов (shallow trench isolation, STI). С каждым

to each other are being carried out. This 3D approach will allow further increasing the number of components per square millimeter, even if the horizontal physical dimensions will no longer be amenable to further scaling.

One of the technologies for creating 3D systems is deep anisotropic etching, which is the most relevant for the formation of MEMS and TSV structures, as well as of DRAM capacitors.

The process of deep anisotropic etching (the Bosch process) is two-stage and cyclic. In the first stage (Fig. 6), rapid isotropic silicon etching occurs in the SF_6 gas plasma, the second stage involves the deposition of a polymer film in the fluorocarbon plasmas. These stages are cyclically repeated. In the first stage of the next cycle, under the action of bombardment with Ar ions, the passivation film

is quickly removed from the bottom of the groove, followed by the removal of silicon. On the side walls, the passivation film is retained by the absence of an ionic component when it is etched.

The main advantages of the Bosch process are the controlled and stable etching profile, good mask selectivity, high etching rate and high aspect ratio. The main disadvantage is the roughness of the walls due to the cyclic etching.

Figure 7 shows the result of deep anisotropic etching of 13 μm holes to a depth of 112 μm under the conditions given in Table 1. The etching unevenness across the wafer was $\pm 3.5\%$.

Figure 8 shows the result of deep anisotropic etching of 1.5- μm -wide trenches under the conditions given in Table 2. The etching unevenness across the wafer was $\pm 3.5\%$.

The Figures 9 and 10 show the scheme of the system for deep anisotropic etching with a loading of up to 200 mm wafers using a lock chamber. The device is designed for plasma-chemical high-speed anisotropic selective deep etching of silicon based on the Bosch process for the formation of through holes in silicon (Through Silicon Vias-TSV) for the production, in particular, of TSV interpolators for 2.5–3D microcircuits, MEMS, etc.

Figure 12 shows the result of etching the structure with smooth trenches 1.5 μm wide under the conditions given in Table 3. The uniformity of etching across the wafer was $\pm 3.5\%$.

Figures 13 and 14 show a scheme of equipment for the formation of shallow trench isolation on up to 200 wafers. The installation is designed for plasma-chemical anisotropic selective etching of polycrystalline silicon, silicon

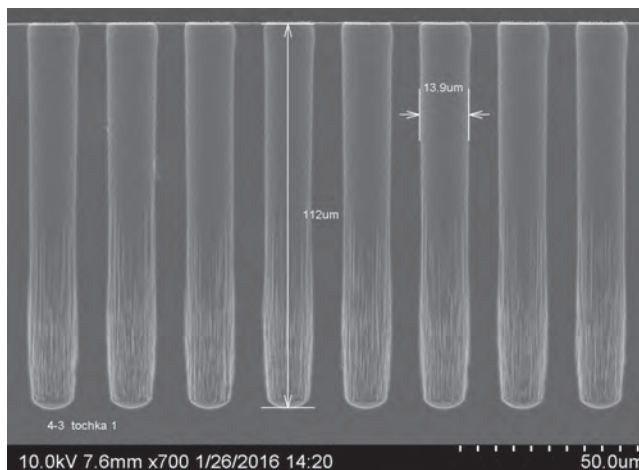


Рис. 7. Травление отверстий диаметром 13 мкм на глубину 112 мкм
Fig. 7. Etching of 13 μm holes to a depth of 112 μm

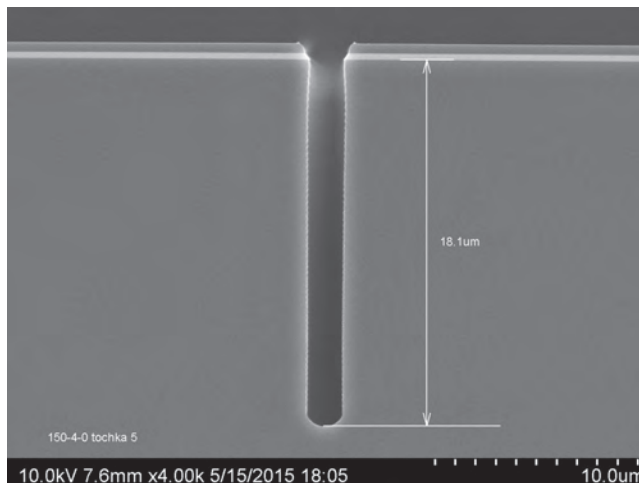


Рис. 8. Травление щелей шириной 1,5 мкм на глубину 18,1 мкм
Fig. 8. Etching of 1.5 μm wide trenches to a depth of 18.1 μm

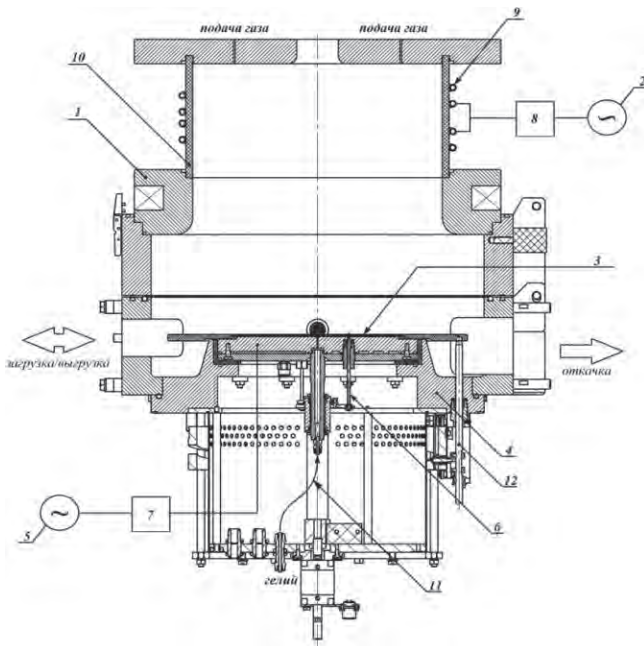


Рис. 9. Конструкция реактора установки для Bosch-процесса (1 — источник плазмы; 2 — ВЧ-генератор; 3 — рабочая пластина; 4 — подложкодержатель; 5 — ВЧ-генератор; 6 — механизм вертикального перемещения; 7 — устройство автоматического согласования; 8 — устройство согласования; 9 — индуктор; 10 — кварцевая колба; 11 — гелиевое охлаждение; 12 — механический прижим)
 Fig. 9. Design of the plant reactor for the Bosch process (1 — plasma source; 2 — HF-generator; 3 — working wafer; 4 — substrate holder; 5 — HF-generator; 6 — vertical movement mechanism; 7 — automatic matching device; 8 — matching device; 9 — inductor; 10 — quartz window; 11 — helium cooling; 12 — mechanical clamp)

Таблица 3. Режимы травления щелей шириной 1,5 мкм
 Table 3. Modes of etching of 1.5 μm trenches

Расход, л/ч Consumption, l/h			Давление, Па Pressure, Pa	Мощность, Вт Capacity, W		Смещение, В Offset, V	Кол-во циклов Number of cycles	Время, с Time, s	
Ar	SF ₆	C ₄ F ₈		Источника плазмы Source of plasma	Столики Stage			SF ₆	C ₄ F ₈
3,6	6	4	9	600	15	50	60	11	4

nitride, trenches with smooth slots for slot insulation at the FEOL stage of VLSI production.

STRIPPING USING MICROWAVE PLASMA SOURCE

The processes of photoresist mask removal remain one of the most common operations in microelectronics. With the development of technologies, new challenges arise in the field of photoresist removal and wafer cleaning, for example, removal of polymer residues after deep anisotropic etching in TSV structures.

Removal of the photoresist mask and polymers is carried out in a reactor with a remote plasma microwave source.

Remote plasma isolates the wafer from ions and electromagnetic fields, which reduces the unwanted effects of the built-in charge, which can damage the active regions of the chip on the wafer. Isotropic processing occurs with the help of chemically active particles in the absence of electromagnetic fields.

Microwave plasma (2.45 GHz) in comparison with HF plasma (13.56 MHz) has a number of advantages. The microwave plasma is characterized by a higher concentration of neutral particles, higher photoresist and other impurities removal rates, a lower concentration of ionized particles, which in turn leads to less damage to other layers

caused by the charge, as well as a higher etch selectivity with respect to the underlying and exposed films.

To prevent diffusion of ions into dielectric or oxide layers, the wafer is heated to a temperature of no more than 270 °C. During the purification process, the radicals can include the following elements: F, Cl, O, H and CF_x, where x = 1, 2 or 3.

When the photoresist is removed, the O radicals move to the surface of the wafer, where they are adsorbed (Fig. 15). Then these radicals react chemically with the C atom to form a CO₂ molecule and with its subsequent desorption.

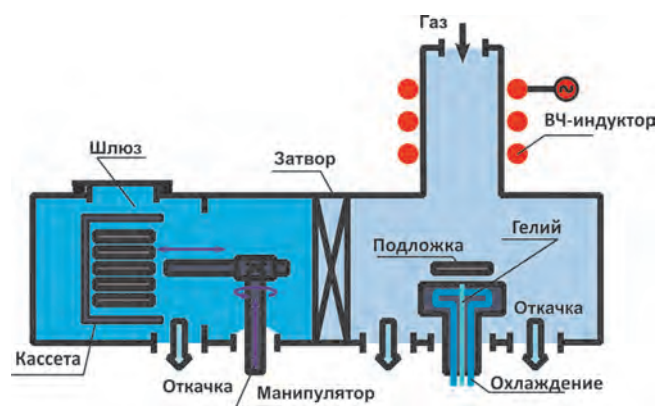


Рис. 10. Схема установки глубокого анизотропного травления с кассетным загрузчиком для пластин диаметром до 200 мм
 Fig. 10. Scheme of equipment for deep anisotropic etching with cassette loader for up to 200 mm wafers

годом критические размеры ИС продолжают уменьшаться и требования к изоляции элементов становятся все более высокими.

Травление кремния с формированием гладких щелей осуществляется при одновременной подаче в камеру травящего и образующего полимер газа. В результате процессы травления кремния и образования полимера на поверхности пластины происходят одновременно, но за счет напряжения смещения травление идет преимущественно в вертикальном направлении (рис. 11).

Основное преимущество процесса — контролируемый профиль травления, селективность к маске и высокое аспектное соотношение. Однако при травлении на большие глубины процесс становится трудноконтролируемым, что делает его нежелательным в технологии TSV.

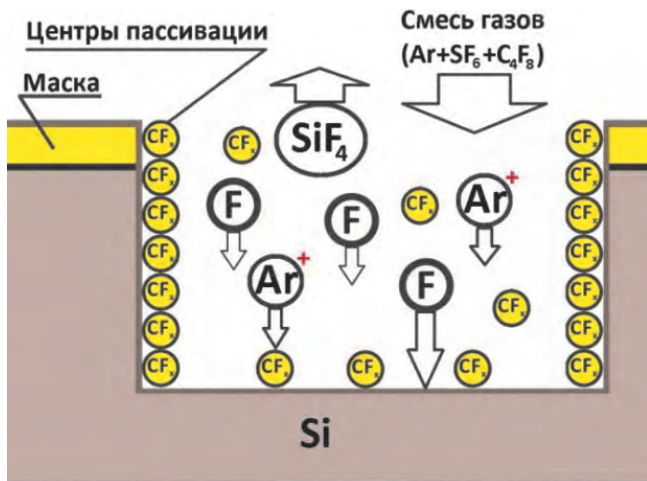


Рис. 11. Схематическое представление поверхностных реакций, формирующих в процессе травления структуры с гладкими стенками
Fig. 11. Schematic representation of surface reactions during etching of structures with smooth walls

На рис. 12 показан результат процесса травления структуры с гладкими щелями шириной 1,5 мкм при режимах, приведенных в табл. 3. Равномерность травления по пластине составила $\pm 3,5\%$.

На рис. 13 и 14 представлены схемы установки формирования мелкощелевой изоляции на пластинах диаметром до 200 мм. Установка предназначена для плазмохимического анизотропного селективного травления поликристаллического кремния, нитрида кремния, траншей с гладкими щелями для щелевой изоляции на стадии FEOL производства СБИС.

ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ-ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ

Процессы удаления фоторезистивной маски остаются одной из самых распространенных операций в микроэлектронике. С развитием технологий возникают все новые задачи при удалении фоторезиста и очистки пластин, например удаление остатков полимера после процессов глубокого анизотропного травления в TSV-структурах.

Удаление фоторезистивной маски и полимеров проводится в реакторе с удаленным СВЧ-источником плазмы.

Удаленная плазма изолирует пластину от ионов и электромагнитных полей, что уменьшает нежелательные эффекты встроенного заряда, которые могут повредить активные области микросхемы на пластине. Изотропная обработка происходит с помощью химически активных частиц в отсутствие электромагнитных полей.

СВЧ-плазма (2,45 ГГц) по сравнению с ВЧ-плазмой (13,56 МГц) имеет ряд преимуществ. Микроволновая плазма характеризуется более высокой концентрацией нейтральных частиц, большими скоростями удаления фоторезиста и др. загрязнений, меньшей концентрацией ионизированных частиц, что, в свою очередь, ведет к меньшему повреждению других слоев, вызванному зарядом, а также более высокой селективности травления по отношению к нижележащим и проэкспонированным пленкам.

Для предотвращения диффузии ионов в диэлектрические или оксидные слои пластину нагревают до температуры не более 270 °С. В процессе очистки радикалы могут включать следующие элементы: F, Cl, O, H и CF_x, где x = 1, 2 или 3.

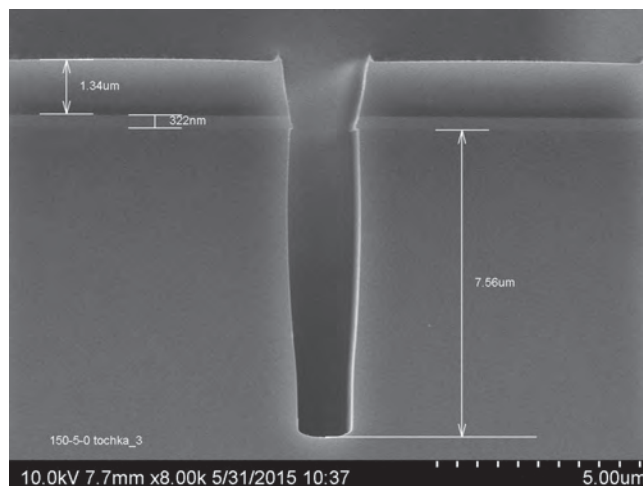


Рис. 12. Травление щелей шириной 1,5 мкм на глубину 7,5 мкм
Fig. 12. Etching of 1.5 μm wide trenches to a depth of 7.5 μm

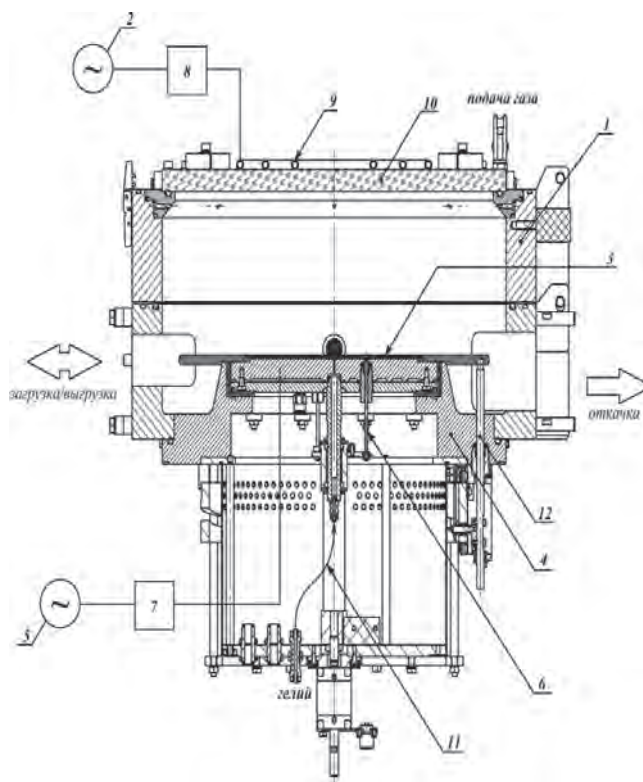


Рис. 13. Конструкция реактора установки для травления мелкощелевой изоляции с гладкими стенками (1 — источник плазмы; 2 — ВЧ-генератор; 3 — рабочая пластина; 4 — подложкодержатель; 5 — ВЧ-генератор; 6 — механизм вертикального перемещения; 7 — устройство автоматического согласования; 8 — устройство согласования; 9 — индуктор; 10 — кварцевое окно; 11 — гелиевое охлаждение; 12 — механический прижим)

Fig. 13. Reactor design for a shallow-shear insulation pickling plant with smooth walls (1 — plasma source; 2 — HF-generator; 3 — working wafer; 4 — substrate holder; 5 — HF-generator; 6 — vertical movement mechanism; 7 — automatic matching device; 8 — matching device; 9 — inductor; 10 — quartz window; 11 — helium cooling; 12 — mechanical clamp)

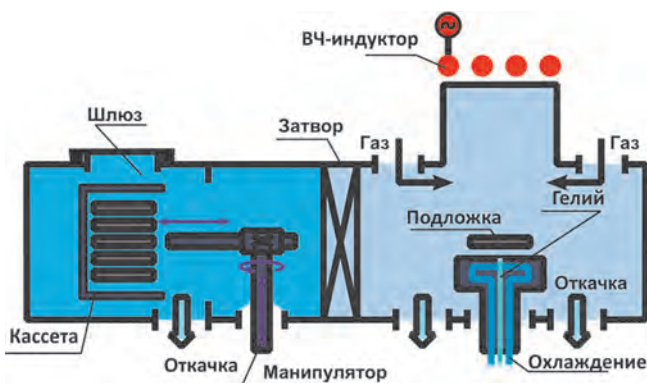


Рис. 14. Схема установки формирования мелкощелевой изоляции с кассетным загрузчиком для пластин диаметром до 200 мм
Fig. 14. Scheme of equipment for the formation of shallow trench isolation with cassette loader for up to 200 mm wafers

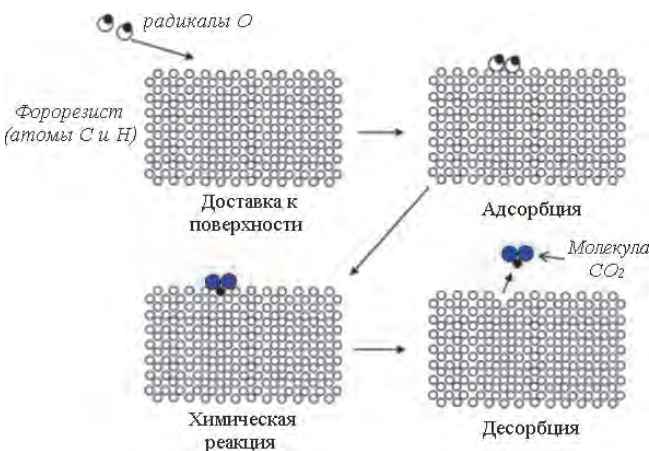
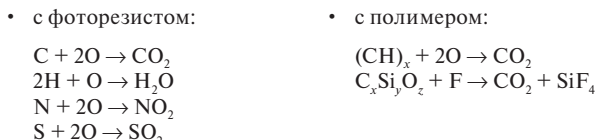


Рис. 15. Схематическое представление последовательности поверхностных реакций в процессе очистки
Fig. 15. Schematic representation of sequence of surface reactions in the stripping process

При удалении фоторезиста радикалы O перемещаются к поверхности пластины, где происходит их адсорбция (рис. 15). Затем эти радикалы вступают в химическую реакцию с атомом C с образованием молекулы CO_2 и последующей десорбцией.

Основные реакции взаимодействия радикалов с фоторезистом и полимерной пленкой протекают следующим образом:



Продукты реакции впоследствии удаляются откачной системой установки.

Таким образом, удаленный источник СВЧ-плазмы изолирует пластину от ионов и электромагнитных полей, которые могут повредить активные области микросхемы, а радикалы обеспечивают очистку изделия и удаление фоторезистивных или полимерных слоев.

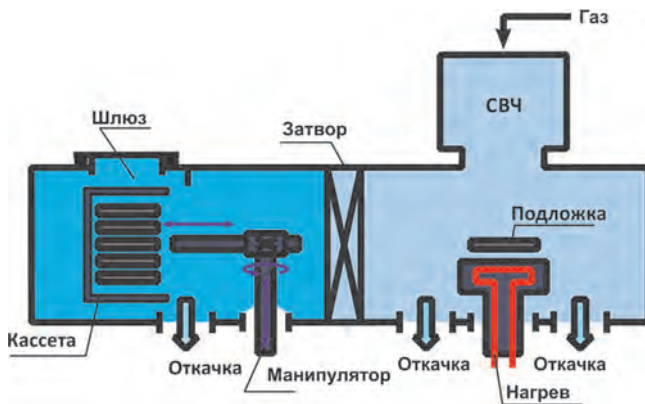


Рис. 16. Схема установки очистки с кассетным загрузчиком для пластин диаметром до 200 мм
Fig. 16. Scheme of stripping system with cassette loader for up to 200 mm wafers

The main reactions of interaction of radicals with photoresist and polymer film proceed as follows:

- with photoresist:
 $C + 2O \rightarrow CO_2$
 $2H + O \rightarrow H_2O$
 $N + 2O \rightarrow NO_2$
 $S + 2O \rightarrow SO_2$
- with polymer:
 $(CH)_x + 2O \rightarrow CO_2$
 $C_xSi_yO_z + F \rightarrow CO_2 + SiF_4$

The reaction products are subsequently removed by a pumping system.

Thus, the remote source of microwave plasma isolates the wafer from ions and electromagnetic fields that can damage the active regions of the chip, while the radicals ensure the purification of the product and the removal of photoresist or polymer layers.

The scheme of the equipment with a source of microwave plasma for the removal of a photoresist or polymer film is shown in Fig. 16 and 17.

A general view of the systems for performing atomic-layer deposition processes, plasma-chemical etching, formation of shallow trench isolation and stripping of the wafer surface is shown in Fig. 18.

The installation is designed to conduct plasma-chemical selective isotropic removal of the photoresist mask (MFM) and to clean the wafers, including the walls (TSV) of structures from the polymer reaction products remaining after silicon etching based on the Bosch process, etc.

Reactors of these units are built into the transport-loading system with the SMIF containers of a cluster installation sample with four technological modules (Fig. 19).

REFERENCES

1. Gushchin O. P., Valeev A. S., Charnov A. A., Mitsyn N. G., Dolgoplov V. M., Odinov V. V., Nemirovskii V. E., Irakin P. A. Razrabotka oborudovaniya i issledovanie tekhnologii glubokogo travleniya kremniya / Elektronnaya tekhnika. Seriya 3. Mikroelektronika, 2015. Vyp. 3 (159). P. 50–54. (In Russian).
2. Danila A. V., Dolgoplov V. M., Irakin P. A., Nemirovskii V. E., Odinov V. V., Pavlov G. Ya. / Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory, 2015. Vyp. 5 (239). P. 42–48. (In Russian).
3. Odinov V. V., Panfilov Yu. V. Vybortipa vakuumno nanotekhnologicheskogo oborudovaniya po kriteriyu zadannoi proizvoditelnosti / Nanoinzheneriya, 2011. № 11. P. 7–18. (In Russian).

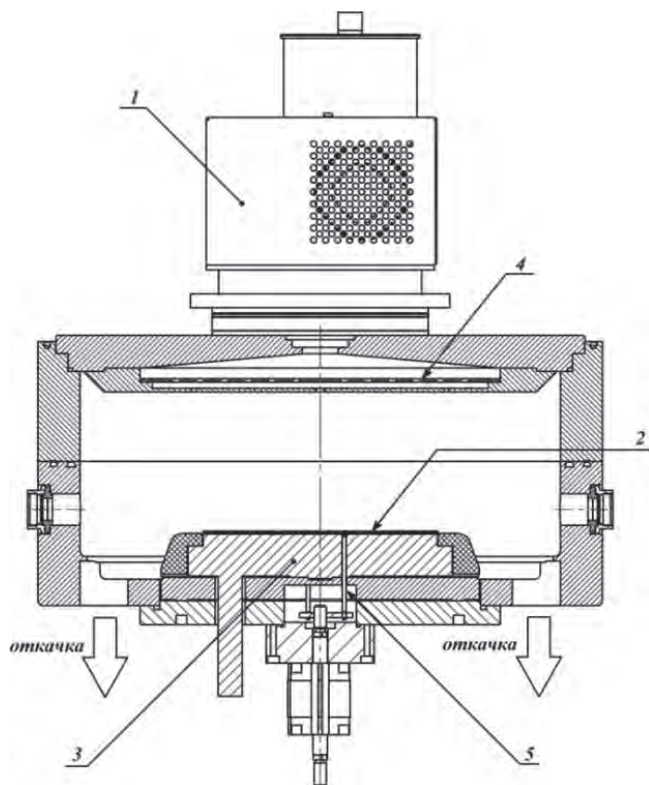


Рис. 17. Конструкция реактора установки с СВЧ-источником для очистки пластин (1 — источник плазмы; 2 — рабочая пластина; 3 — подложкодержатель; 4 — защитная сетка; 5 — механизм вертикального перемещения)

Fig. 17. The reactor design for a plant with a microwave source for cleaning plates (1 — plasma source; 2 — working wafer; 3 — substrate holder; 4 — protective mesh; 5 — vertical movement mechanism)

Схема установки с источником СВЧ-плазмы для удаления фоторезиста или полимерной пленки приведена на рис. 16 и 17.

Общий вид установок для проведения процессов атомно-слоевого осаждения, плазмохимического травления, формирования микрошелевой изоляции и очистки поверхности пластин представлен на рис. 18.

Установка предназначена для проведения плазмохимического селективного изотропного удаления фоторезистивной маски (ФРМ) и очистки пластин, в том числе стенок (TSV) структур от полимерных продуктов реакции, оставшихся после травления кремния на базе Bosch-процесса и др.

Реакторы указанных установок встраиваются в транспортно-загрузочную систему со СМIF-контейнерами образца кластерной установки с четырьмя технологическими модулями (рис. 19).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гущин О.П., Валеев А.С., Чамов А.А., Мицын Н.Г., Долгополов В.М., Одинокоев В.В., Немировский В.Э., Иракин П.А. Разработка оборудования и исследование технологии глубокого травления кремния // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2015. — Вып. 3 (159). — С. 50–54.
2. Данила А.В., Долгополов В.М., Иракин П.А., Немировский В.Э., Одинокоев В.В., Павлов Г.Я. // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2015. — Вып. 5 (239). — С. 42–48.



Рис. 18. Четыре вида установок с загрузкой пластин диаметром до 200 мм с помощью кассетного загрузчика

Fig. 18. Four types of systems with cassette loader for up to 200 mm wafers



Рис. 19. Транспортно-загрузочная система пластин диаметром 200 мм с использованием СМIF-контейнеров

Fig. 19. Transport-loading system of wafers with a diameter of 200 mm using SMIIF containers

3. Одинокоев В.В., Панфилов Ю.В. Выбор типа вакуумно-нанотехнологического оборудования по критерию заданной производительности // Нанотехнология, 2011. — № 11. — С. 7–18.