НОВЫЕ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

NEW VACUUM-PLASMA PROCESSES AND EQUIPMENT FOR MICROELECTRONICS

УДК 621.382, БАК 05.27.01, DOI: 10.22184/1993-8578.2017.78.7.72.81

В.Одиноков* / vodinokov@niitm.ru
V.Odinokov*

Рассмотрены актуальные вакуумно-плазменные процессы для микроэлектроники: атомно-слоевое осаждение, плазмохимическое травление, формирование мелкощелевой изоляции и очистка поверхности пластин.

Current vacuum-plasma processes for microelectronics including atomic layer deposition, plasma-chemical etching, shallow trench isolation technique and wafer stripping are considered.

ОАО "Научно-исследовательский институт точного машиностроения" освоило новые вакуумно-плазменные технологические процессы и разработало промышленное автоматизированное оборудование для серийного 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 ними перемежаются продувкой инертным газом и откачкой объема реактора для удаления излишков прекурсоров и газообразных продуктов реакции. Ростовый процесс в каждом цикле самоограничивается толщиной одного монослоя выращиваемой пленки. Схематически фазы атомно-слоевого цикла показаны на рис.1. На рис.2 представлены примеры химических процессов, протекающих на поверхности образца при осаждении пленок оксида алюминия Al_2O_3 , оксида титана TiO_2 и оксида цинка ZnO .

* ОАО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения» / Research Institute of Precision Machine Manufacturing.

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

Преимуществом метода АСО 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 °С. Однако скорость осаждения оказывается существенно ниже, чем при использовании других методов, что ограничивает применение АСО только задачами прецизионного нанесения сверхтонких пленок.

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 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 показана схема установки АСО с плазменной активацией и поштучной загрузкой пластин диаметром до 200 мм с помощью шлюзовой камеры. На рис.4 показана схема подготовки и подачи прекурсоров. Прекурсорами называются химические реактивы, компоненты

Research Institute of Precision Machine Manufacturing mastered new vacuum-plasma 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 circuit topology will be 5-10 nm, and the 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 (conformity, 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.);

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

Fig.2. Chemical reactions on surface of samples during atomic layer deposition of ultrathin films of Al_2O_3 (A), TiO_2 (B) and ZnO (C)

которых реагируют с компонентами на поверхности образцов, в результате чего формируется один молекулярный слой вещества с образованием летучих соединений, которые затем удаляются продувкой реактора. Прекурсоры – в основном металлоорганические соединения с различным уровнем давления насыщенных 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 °С. Для подачи такого прекурсора в реактор также следует выполнять барботирование – прокачивать инертный газ с определенным расходом через ампулу

Рис.3. Схема установки АСО с плазменной активацией и загрузкой пластин диаметром до 200 мм с помощью кассетного загрузчика

Fig.3. Scheme of ALD system with plasma activation and loading of up to 200 mm wafers using cassette loader

(барботер), в которой находится прекурсор. Если давление на поверхности металлоорганической жидкости больше 133,33 Па, то такое соединение называют прекурсором с высоким давлением,

- 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), the interaction product of which forms a dielectric or metal film. In ALD, the phases of sorption of precursors and the reactions 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. Fig.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 by the problems of precision deposition of ultrathin films.

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

Рис.4. 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 (TBTDET) 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.4. Diagram 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 (TBTDET) with low saturated vapor pressure; 3 – bubbler with organometallic aluminum precursor (ТМА) with high saturated vapor pressure; 4 – bubbler with organometallic titanium precursor (TiCl_4) with high saturated vapor pressure

и для подачи в реактор его необходимо охлаждать до температуры от 10 до 20 °С. Пропускание инертного газа через барботер в этом случае не требуется.

ГЛУБОКОЕ АНИЗОТРОПНОЕ ТРАВЛЕНИЕ

По прогнозам производителей ИС на 2020–2025 годы, физические размеры минимальных элементов КМОП уменьшатся ниже порога 10 нм.

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 remote from the reactor for 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 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.

Fig.3 shows the scheme of the ALD system with plasma activation and single-piece loading of up to 200 mm wafers using a lock chamber. Fig.4 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 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 an 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

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, SF_6 Number of cycles, SF_6	Время, с Time, s	
Ar	SF_6	C_4F_8		Источник плазмы Source of plasma	Столик Stage			SF_6	C_4F_8
3	6	2,2	9	500	10	30	260	11	4

Рис.5. Схематическое представление последовательности поверхностных реакций, формирующих один цикл Bosch-процесса

Fig.5. Schematic representation of sequence of surface reactions that form one cycle of Bosch process

the bubbler in this case is not required.

DEEP ANISOTROPIC ETCHING

According to the forecasts of 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 to stack transistor drains to each other are being carried out. This 3D approach will

allow to continue to increase 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.5), rapid isotropic silicon etching occurs in the SF_6 gas plasma, the second stage involves

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.5) осуществляется быстрое изотропное травление кремния в плазме SF_6 газа, на второй – осаждение полимерной

the deposition of a polymer film in a 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

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		Источник плазмы Source of plasma	Столик Stage			SF ₆	C ₄ F ₈
3,6	6	4	9	600	15	50	60	11	4

пленки во фторуглеродной плазме. Эти стадии циклически повторяются. На первой стадии следующего цикла под действием бомбардировки ионами Ar происходит быстрое удаление пассивирующей пленки со дна канавки, с последующим удалением кремния. На боковых стенках пассивирующая пленка сохраняется 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.6 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.7 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.8 приведена схема установки глубокого анизотропного травления с поштучной загрузкой пластин диаметром до 200 мм с помощью шлюзовой камеры.

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

roughness of the walls due to the cyclic etching.

Fig.6 shows the result of deep anisotropic etching of 13 μm holes at a depth of 112 μm under the conditions given in Table 1. The etching unevenness across the wafer was $\pm 3.5\%$.

Fig.7 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 $\pm 3.5\%$.

Fig.8 shows a diagram of the system for deep anisotropic etching with loading of up to 200 mm wafers using a lock chamber.

FORMATION OF SHALLOW TRENCH ISOLATION

With the development of nanotechnology, plasma-chemical etching has become almost the only tool for transferring the IC pattern in the masking layer to the substrate. In addition, an important stage in the formation of IC is the manufacture of insulation elements in a silicon substrate. After the semiconductor industry reached a critical size of 0.25 μm , the shallow trench isolation technology (STI) began to be applied. Each year, the critical dimensions of IC continue to decrease, and the requirements

for the isolation of elements are becoming increasingly high.

Silicon etching with the formation of smooth trenches is carried out by simultaneously feeding into the chamber of the etching and polymer forming gases. As a result, silicon etching and polymer formation on the wafer surface occur simultaneously, but due to the bias voltage, the etching proceeds mainly in the vertical direction (Fig.9). The main advantage of the process is the controlled etching profile, mask selectivity and high aspect ratio. However, when etched to great depths, the

Рис.6. Травление отверстий диаметром 13 мкм на глубину 112 мкм

Fig.6. Etching of 13 μm holes to depth of 112 μm

Травление кремния с формированием гладких щелей осуществляется при одновременной подаче в камеру травящего и образующего полимер газов. 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.9). Основное преимущество процесса – контролируемый профиль травления, селективность к маске и высокое аспектное соотношение.

Рис.7. Травление щелей шириной 1,5 мкм на глубину 18,1 мкм

Fig.7. Etching of 1.5 μm wide trenches to depth of 18.1 μm

Однако при травлении на большие глубины процесс становится трудно контролируемым, что делает его нежелательным в технологии TSV.

На рис.10 показан результат 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.11 представлена схема установки формирования мелкощелевой изоляции на пластинах диаметром до 200 мм.

Рис.8. Схема установки глубокого анизотропного травления с кассетным загрузчиком для пластин диаметром до 200 мм

Рис.9. Схематическое представление поверхностных реакций в процессе травления структур с гладкими стенками

Рис.10. Травление щелей шириной 1,5 мкм на глубину 7,5 мкм
Fig.10. Etching of 1.5 μm wide trenches to depth of 7.5 μm

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 по удалению 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

Рис.11. Схема установки формирования мелкощелевой изоляции с кассетным загрузчиком для пластин диаметром до 200 мм

Fig.11. Scheme of equipment for formation of shallow trench isolation with cassette loader for up to 200 mm wafers

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,

process becomes difficult to control, which makes it undesirable in TSV technology.

Fig.10 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 $\pm 3.5\%$.

Fig.11 shows a scheme of equipment for the formation of shallow trench isolation on up to 200 mm wafers.

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 the other layers caused by the charge, as well as by a higher etch selectivity with

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	Время, с Time, s
Ar	SF ₆	C ₄ F ₈		Источник плазмы Source of plasma	Столик Stage		
3,6	4	6	9	600	20	85	450

большими скоростями удаления фоторезиста и других загрязнений, меньшей концентрацией ионизированных частиц, что, в свою очередь, ведет к меньшему повреждению других слоев, вызванному зарядом, а также более высокой селективностью 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.

При удалении фоторезиста радикалы O перемещаются к поверхности пластины, где происходит их адсорбция (рис.12). Затем эти радикалы вступают в химическую реакцию с атомом C с образованием молекулы CO₂ и последующей ее десорбцией.

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

- с фоторезистом:

- с полимером:

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.12. Схематическое представление последовательности поверхностных реакций в процессе очистки

Fig.12. Schematic representation of sequence of surface reactions in stripping process

Рис.13. Схема установки очистки с кассетным загрузчиком для пластин диаметром до 200 мм

Fig.13. Scheme of stripping system with cassette loader for up to 200 mm wafers

Рис.14. Четыре вида установок с загрузкой пластин диаметром до 200 мм с помощью кассетного загрузчика
Fig.14. Four types of systems with cassette loader for up to 200 mm wafers

Схема установки с источником СВЧ-плазмы для удаления фоторезиста или полимерной пленки приведена на рис.13.

Общий вид установок для проведения процессов атомно-слоевого осаждения, плазмохимического травления, формирования микрощелевой изоляции и очистки поверхности пластин представлен на рис.14.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гущин О.П., Валеев А.С., Чамов А.А., Мицын Н.Г., Долгополов В.М., Одинок 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., Одинок В.В., Павлов Г.Я. Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2015. Вып. 5 (239). С. 42–48.
3. Одинок В.В., Панфилов Ю.В. Выбор типа вакуумно нанотехнологического оборудования по критерию заданной производительности // Наноинженерия. 2011. № 11. С. 7–18.

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.12). Then these radicals react chemically with the C atom to form a CO_2 molecule and with its subsequent desorption.

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

- with photoresist:

- with polymer:

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, and 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.13.

A general view of the systems for performing atomic-layer deposition, plasma-chemical etching, formation of shallow trench isolation, and stripping of the wafer surface is shown in Fig.14. ■