

### СЕКЦИЯ 3. СПЕЦИАЛЬНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

#### Перспективные вакуумно-плазменные процессы и экспериментальное оборудование

*В.В. Одинок*

*Москва, Зеленоград, ОАО «Научно-исследовательский институт точного  
машиностроения», Панфиловский проспект, д. 10  
e-mail: vodinokov@niitm.ru*

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

*Perspective vacuum-plasma processes and experimental equipment. V.V. Odinokov. Current vacuum-plasma processes and experimental equipment are considered: atomic-layer deposition, plasma-chemical etching, fine-gap insulation formation and surface cleaning of plates.*

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

#### I. Атомно-слоевое осаждение

Согласно дорожной карте развития микроэлектроники к 2020 году минимальный характерный размер топологии интегральных микросхем будет достигать 5-10нм, 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, 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 удаляются 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

рисунке 2 показаны примеры химических процессов, протекающих на поверхности образца при осаждении пленок оксида алюминия  $Al_2O_3$ , оксида титана  $TiO_2$  и оксида цинка  $ZnO$ .

#### Схема процесса

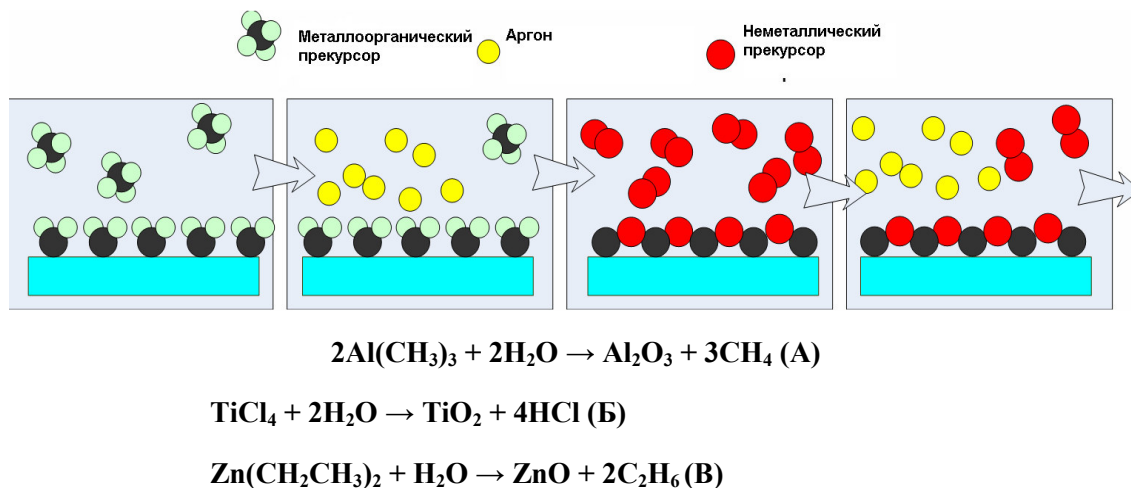


Рис. 2. Химические реакции, протекающие на поверхности образцов при атомно-слоевом осаждении сверхтонких пленок оксида алюминия  $Al_2O_3$  (А), оксида титана  $TiO_2$  (Б) и оксида цинка  $ZnO$  (В).

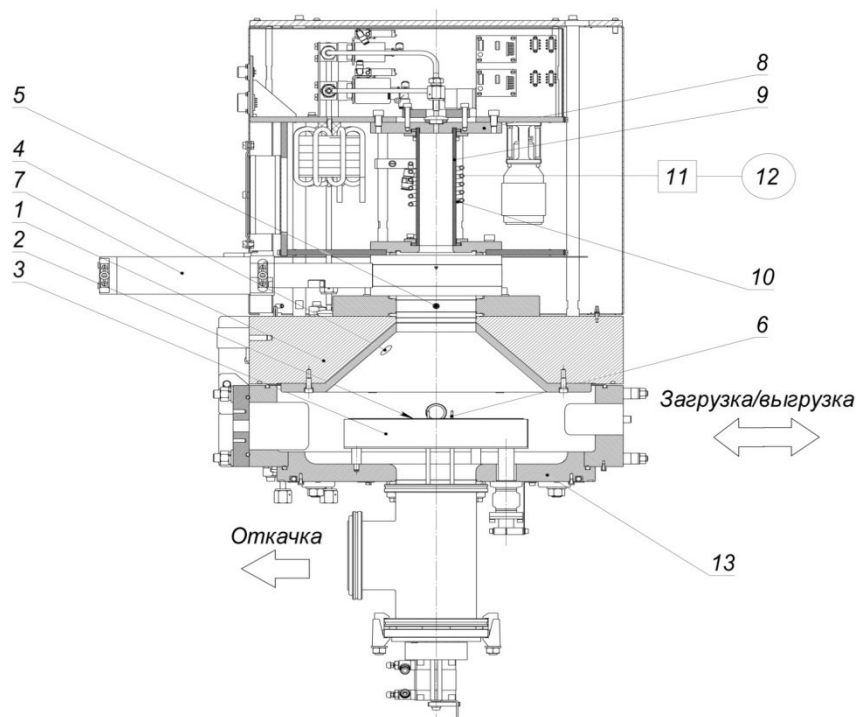
Преимуществом метода атомно-слоевого осаждения является хорошее управление стехиометрическим составом наносимых пленок с высокой степенью однородности по площади пластины. Их толщина образуется в процессе роста с точностью до одного мономолекулярного слоя. Температура пластины в процессе нанесения пленки не превышает  $300\text{ }^\circ\text{C}$ . 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 вот оборудование для его реализации должно оснащаться большим количеством надежных узлов, так как используется воспламеняющиеся и вредные для здоровья химические реактивы, которые необходимо быстро повторно-циклично подавать в реактор.

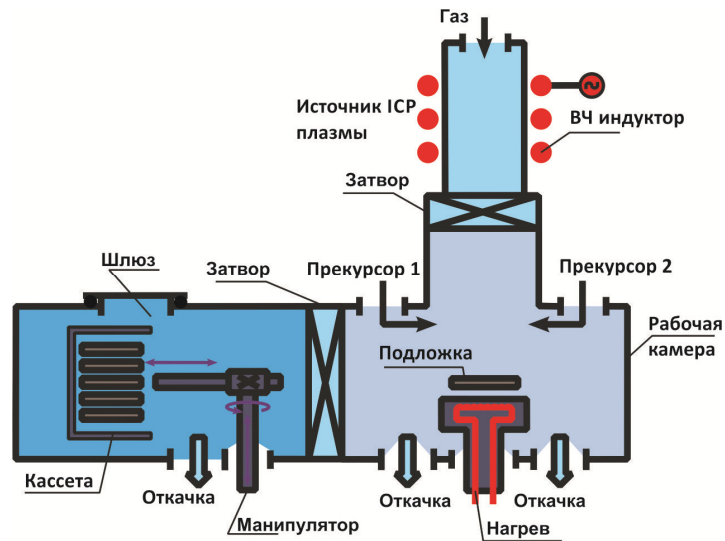
На рисунке 3 и 4 показаны конструкция реактора АСО и схема установки АСО с плазменной активацией и поштучной загрузкой пластин диаметром до 200 мм с помощью шлюзовой камеры. Установка АСО предназначена для проведения низкотемпературного плазмостимулированного атомарно-слоевого осаждения (ПАСО) барьерных, 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 подзатворного диэлектрика  $HfO_2$  для технологии с топологическим размером 65-45-32 нм., в том числе high-кподзатворных ферроэлектрических и/или сегнетоэлектрических диэлектриков для оперативных энергонезависимых 3У 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. 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 (барботер), в которой находится прекурсор. 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 охлаждать до температур от 10 до 20 °С. Пропускание инертного газа через барботер в этом случае не требуется.

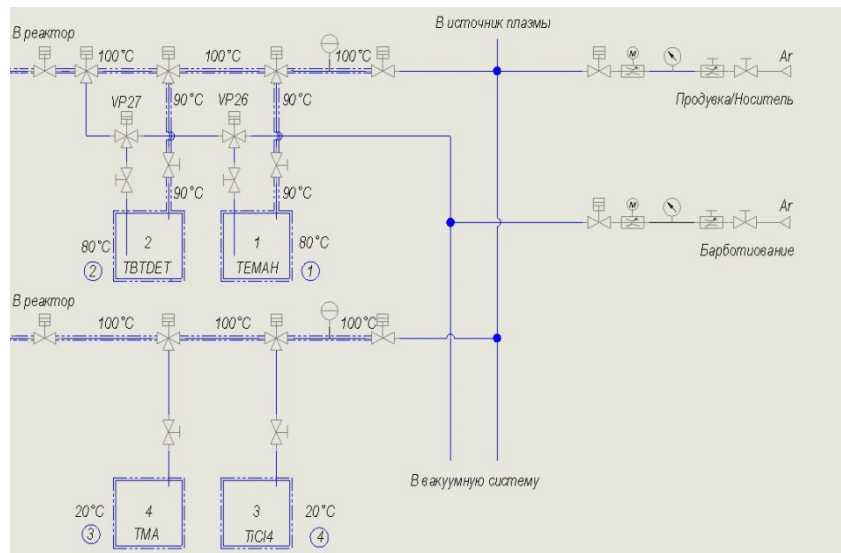


- |   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1 – верхняя камера;                         | 9 – керамическая колба;       |
| 2 – кремниевая пластина диаметром 200 мм;   | 10 – индуктор;                |
| 3 – подложкодержатель;                      | 11 – согласующее устройство;  |
| 4 – отверстие для подачи прекурсоров;       | 12 – ВЧ – генератор;          |
| 5 – отверстие для подачи продувочного газа; | 13 – присоединительный фланец |
| подложкодержателя                           |                               |
| 6 – механизм вертикального перемещения;     |                               |
| 7 – вакуумный клапан;                       |                               |
| 8 – источник плазмы;                        |                               |

Рис.3. Конструкция реактора установки АСО.



*Рис. 4. Схема установки АСО с плазменной активацией и загрузкой пластин диаметром до 200 мм с помощью кассетного загрузчика.*



*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.*

## II. 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 MEMSi 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 SF<sub>6</sub> газа, на второй - осаждение полимерной пленки во фторуглеродной плазме. Эти стадии циклически повторяются. На первой стадии следующего цикла под действием ионной бомбардировки ионами Ag происходит быстрое удаление пассивирующей пленки со дна канавки, с последующим удалением кремния. На боковых стенках пассивирующая пленка остается, за счет отсутствия ионной компоненте 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 циклическости травления.

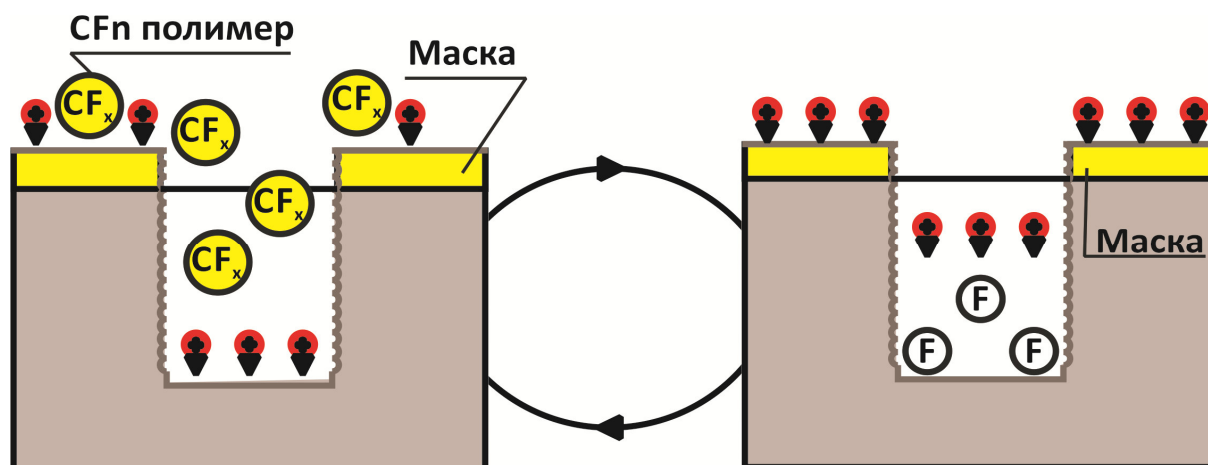
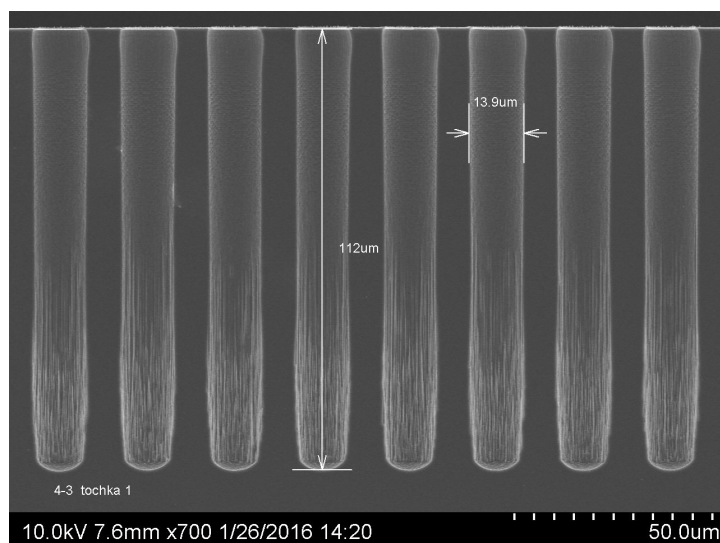


Рис. 6. Схематическое представление последовательности поверхностных реакций, формирующих один цикл Bosch процесса.

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

Таблица 1. Режимы травления отверстий диаметром 13 мкм

Расход, л/ч			Давление, Па	Мощность, Вт		Смещение, В	Кол-во циклов SF <sub>6</sub>	Время, с	
Ar	SF <sub>6</sub>	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>		Источника плазмы	Столика			C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>
3	6	2,2	9	500	10	30	260	11	4

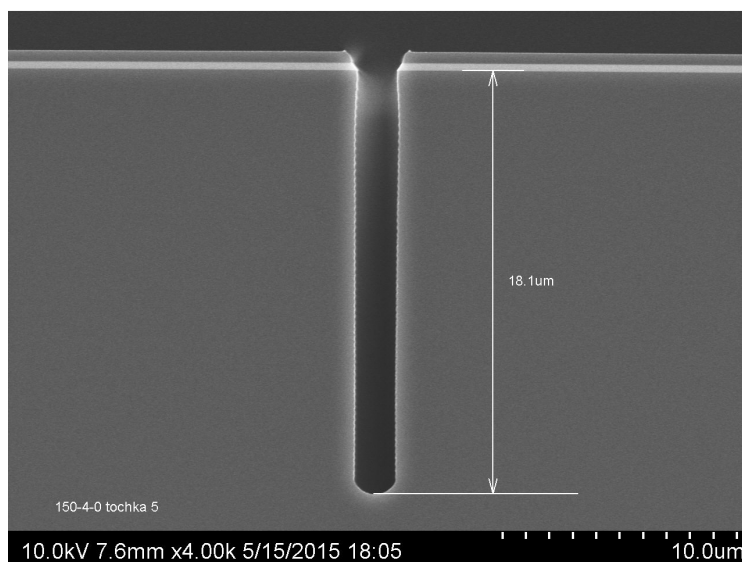


*Рис. 7. Травление отверстий диаметром 13 мкм на глубину 112 мкм.*

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

Таблица 2. Режимы травления щелей, шириной 1,5 мкм

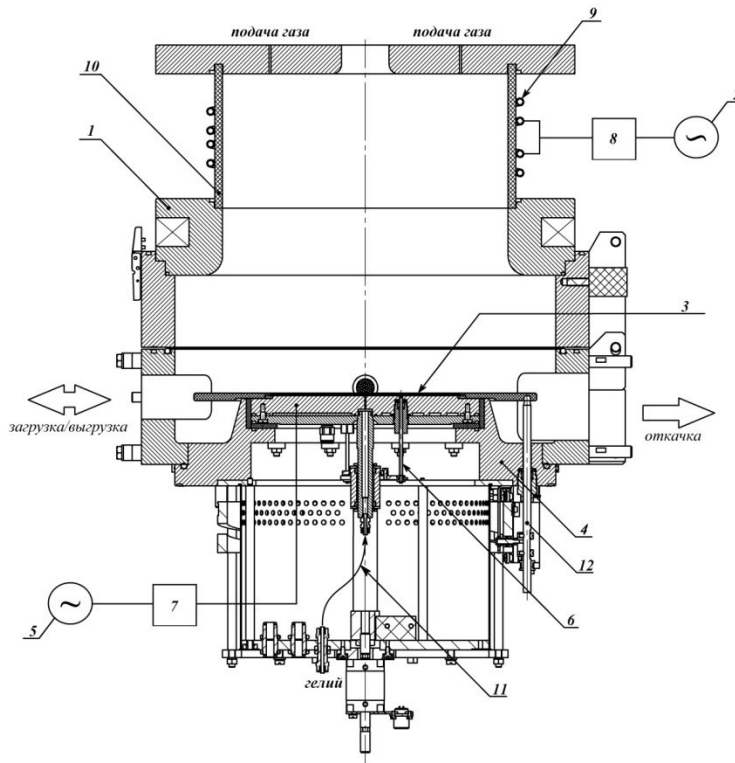
Расход, л/ч			Давление, Па	Мощность, Вт		Смещение, В	Кол-во циклов	Время, с	
Ar	SF <sub>6</sub>	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>		Источника плазмы	Столики			SF <sub>6</sub>	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>
3,6	6	4	9	600	15	50	60	11	4



*Рис. 8. Травление щелей шириной 1,5 мкм на глубину 18,1 мкм.*

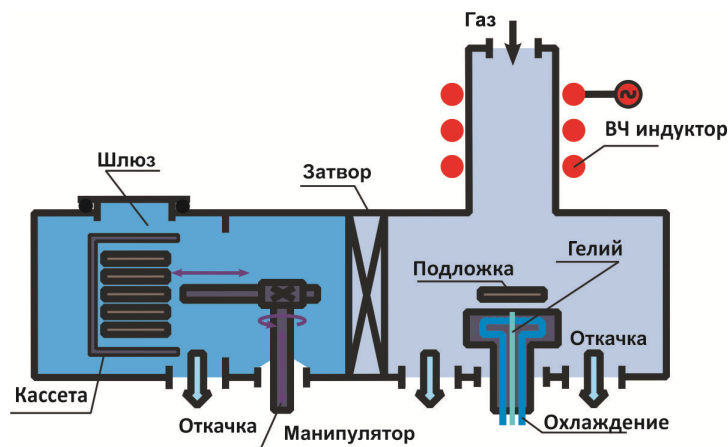
На рис. 9 и 10 приведена схема установки глубокого анизотропного травления с поштучной загрузкой пластин диаметром до 200 мм с помощью шлюзовой камеры. Установка предназначена для плазмохимического высокоскоростного анизотропного селективного глубокого травления кремния на базе Bosch - процесса для формирования сквозных отверстий в

кремнии (Through Silicon Vias-TSV) для производства, в частности, TSV-интерпозеров для 2,5-3D –микросборок, МЭМС и др.



*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.*



*Рис. 10. Схема установки глубокого анизотропного травления с кассетным загрузчиком для пластин диаметром до 200 мм.*



### III. 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.

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 трудно контролируемым, что делает его нежелательным в технологии TSV.

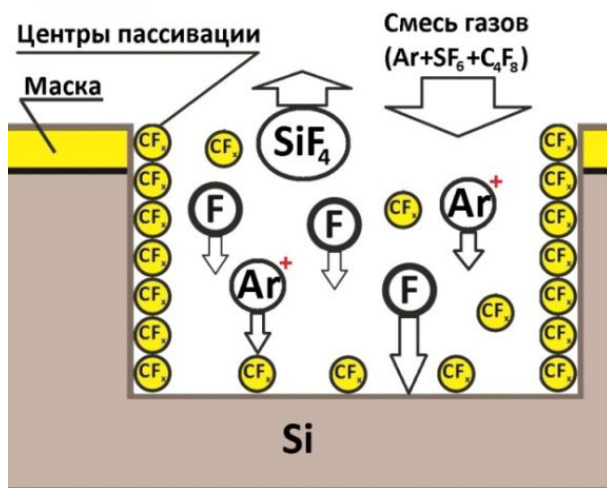


Рис. 11. Схематическое представление поверхностных реакций, формирующих в процессе травления структур с гладкими стенками.

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

Таблица 3. Режимы травления щелей шириной 1,5 мкм

Расход, л/ч			Давление, Па	Мощность, Вт		Смещение, В	Время, с
Ar	SF <sub>6</sub>	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>		Источника плазмы	Столика		
3,6	4	6	9	600	20	85	450



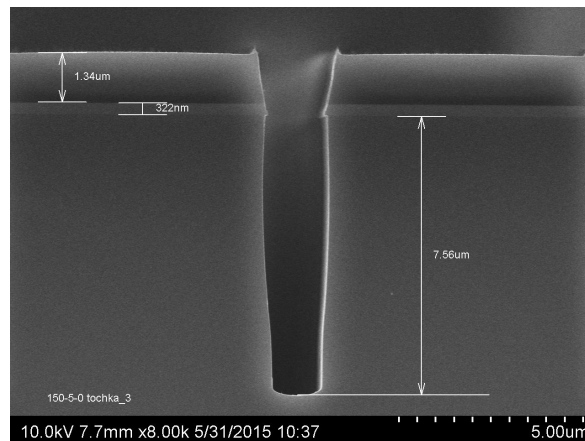


Рис. 12. Травление щелей шириной 1,5 мкм на глубину 7,5 мкм.

На рис. 13 и 14 представлены схема 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.

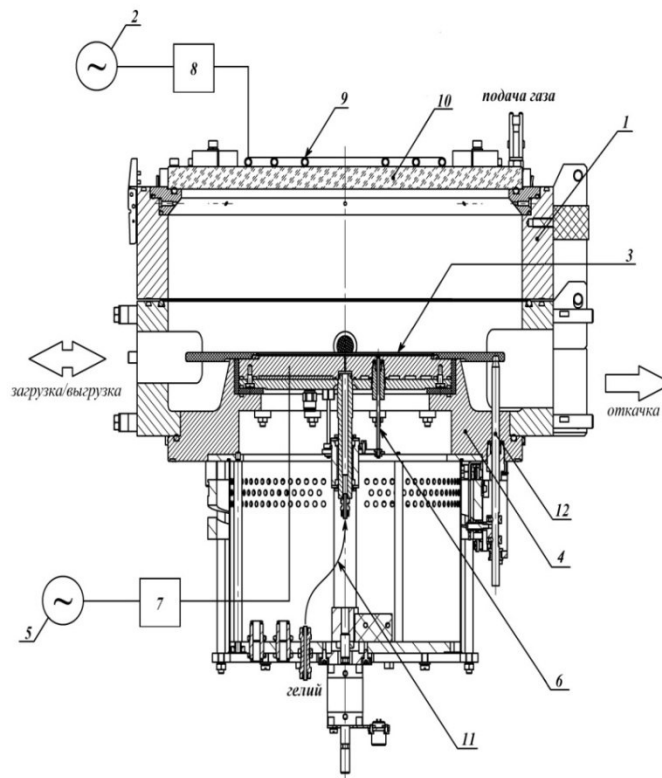


Рис. 13. Конструкция реактора установки для травления мелкощелевой изоляции с гладкими стенками.

- 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.

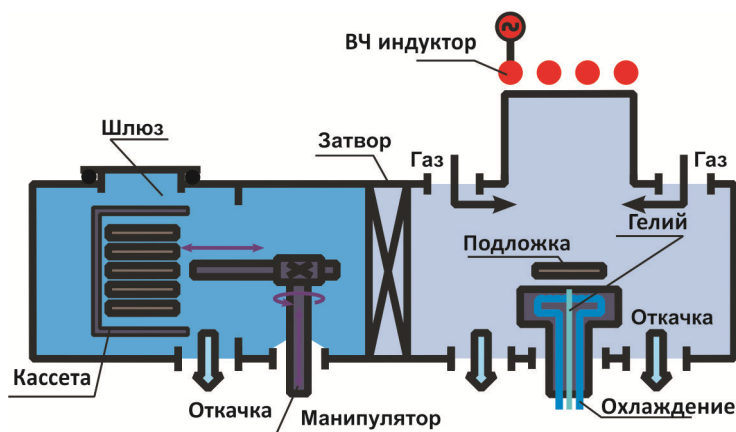


Рис. 14. Схема установки формирования мелкощелевой изоляции с кассетным загрузчиком для пластин диаметром до 200 мм.

#### IV. 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.

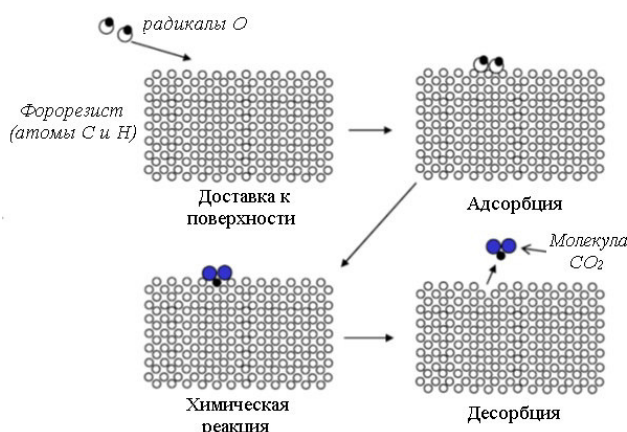
Удаление фоторезистивной маски и полимеров проводится в ректоре с удалённым СВЧ-источником плазмы.

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<sup>0</sup>С. В процессе очистки радикалы могут включать следующие элементы: F, Cl, O, H и CF<sub>x</sub>, где x = 1, 2 или 3.

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<sub>2</sub> и последующей десорбцией.



*Рис. 15. Схематическое представление последовательности поверхностных реакций в процессе очистки.*

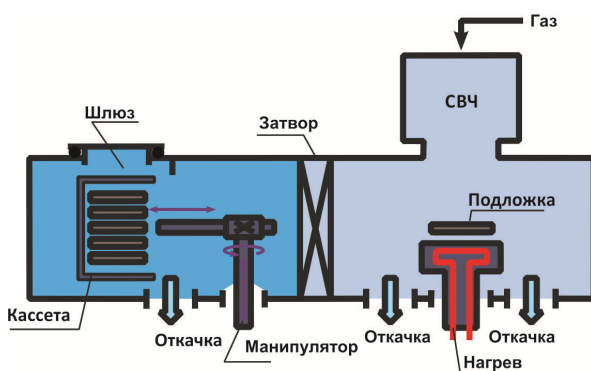
Основные реакции взаимодействия радикалов с фоторезистом и полимерной пленкой протекают следующим образом:

- с фоторезистом:
  - $C + 2O \rightarrow CO_2$
  - $2H + O \rightarrow H_2O$
  - $N + 2O \rightarrow NO_2$
  - $S + 2O \rightarrow SO_2$
- с полимером:
  - $(CH)_x + 2O \rightarrow CO_2$
  - $C_xSi_yO_z + F \rightarrow CO_2 + SiF_4$

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.

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



*Рис. 16. Схема установки очистки кассетным загрузчиком для пластин диаметром до 200 мм.*

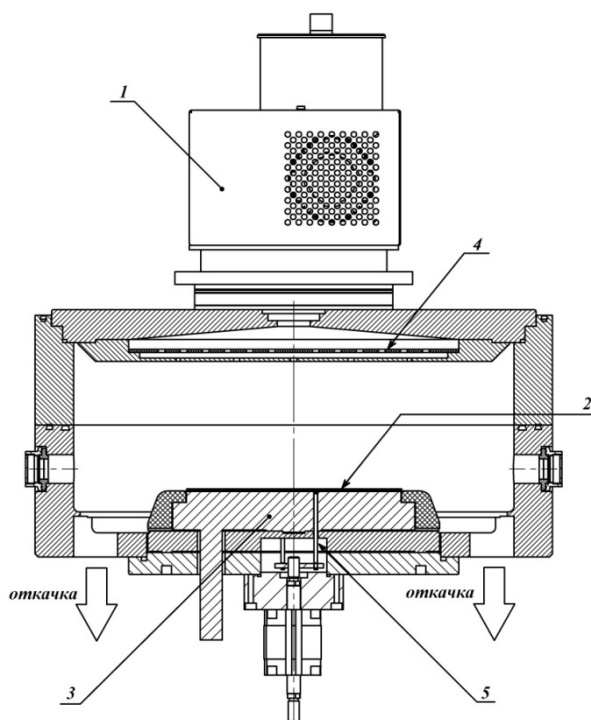


Рис.17. Конструкция реактора установки с СВЧ источником для очистки пластин.  
1 – источник плазмы; 2 – рабочая пластина; 3 – подложкодержатель; 4 – защитная сетка; 5 – механизм вертикального перемещения.

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



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

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 СМДФ контейнерами образца кластерной установки с четырьмя технологическими модулями. (рис.19).



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

#### Литература

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