

2. Михайлов В.П., Базиненков А.М., Акимов И.Ю. Системы активной виброизоляции реологического типа // Высокие технологии в промышленности России. Материалы XIII Международной научно-технической конференции. Москва, 2007. С. 150-158.
3. Исследование свойств и новое применение магнитных силиконовых композитов / А. И. Горбунов, В. П. Михайлов, Г. В. Степанов и др. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2008. № 1 (70). С. 90–107.
4. Системы точного позиционирования и активной виброизоляции для нанотехнологического оборудования / В. П. Михайлов, А. М. Базиненков, И. К. Зобов и др. // Наноинженерия. 2011. № 3. С. 47–57.
5. Магнитореологические устройства активной виброизоляции и позиционирования для прецизионного вакуумного оборудования / В. П. Михайлов, А. М. Базиненков, И. К. Зобов и др. // Вакуумная техника и технология. 2011. Т. 21. № 3. С. 165–169.
6. Виброзащитные системы с квазиулеевой жесткостью / П. М. Алабужев, А. А. Гритчин, Л. И. Ким и др.; Под ред. К. М. Рагульскаса. Л.: Машиностроение, 1986. 96 с.
7. V. P. Mikhailov, A. M. Bazinenkov. A Vibration-Control Platform on the Basis of Magnetorheological Elastomers. *Instruments and Experimental Techniques*, 2016, Vol. 59, No. 1, pp. 131–135.
8. Левин С.Ф. Об основаниях теории измерительных задач: [Электронный ресурс] URL: http://pribory-si.ru/publication/index.php?ELEMENT_ID=5119 (18.06.2017).

Новые вакуумно-плазменные процессы и оборудование для микроэлектроники

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 для микроэлектроники: процессы атомно-слоевого осаждения, плазмохимического травления, формирования мелкощелевой изоляции и очистки поверхности пластин.

***The new vacuum-plasma processes and equipment for microelectronics. V.V. Odinkov.**
Current vacuum-plasma processes for microelectronics: processes of atomic-layer deposition, plasma-chemical etching, formation of shallow trench isolation and surface plate cleaning are considered.*

I. 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, чтобы обеспечить 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 толщиной в нанометровом диапазоне. Кроме того, сверхтонкие покрытия, полученные атомно-слоевым осаждением, обладают рядом уникальных характеристик: конформность, сплошность, стехиометрия, способствующим их применению в различных отраслях, как например:

- 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)

Атомно-слоевое осаждение (АСО) реализуется в виде повторно-циклируемой химической реакции последовательно адсорбированных на подложке двух реагентов – прекурсоров, продукт реакции которых формирует пленку диэлектрика либо металла. В АСО фазы сорбции прекурсоров и собственно реакции между прекурсорами перемежаются с 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, протекающие на поверхности образца при осаждении пленок оксида алюминия Al_2O_3 , оксида титана TiO_2 и оксида цинка ZnO .

Схема процесса

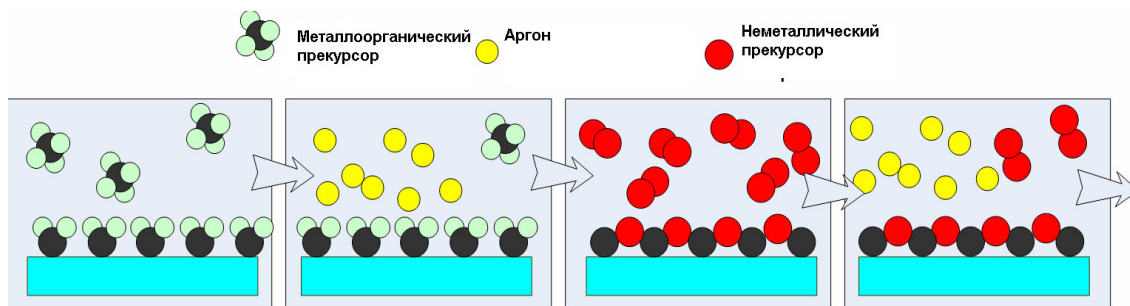


Рис. 1. Схематическое представление последовательности поверхностных реакций, формирующих один цикл АСО.

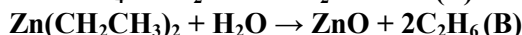
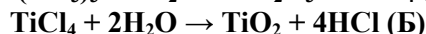
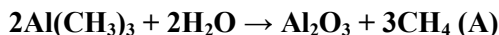


Рис. 2. Химические реакции, протекающие на поверхности образцов при атомно-слоевом осаждении сверхтонких пленок оксида алюминия Al_2O_3 (А), оксида титана TiO_2 (Б) и оксида цинка ZnO (B).

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

Для повышения производительности процесса АСО можно применять, например, 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 имеет место наличие воспламеняющихся и вредных для здоровья химических реактивов, 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.

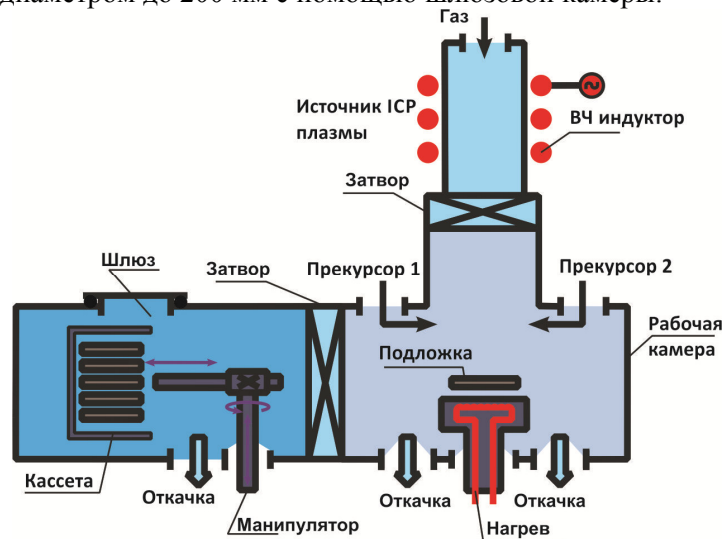


Рис. 3. Схема установки АСО с плазменной активацией и загрузкой пластин диаметром до 200 мм с помощью кассетного загрузчика.

На рис. 4 показана схема подготовки и подачи прекурсоров. Прекурсорами называются химические реактивы, компоненты которых реагируют с компонентами на поверхности образцов, в результате чего образуется один молекулярный слой вещества с образованием летучих соединений, которые затем удаляются продувкой реактора.

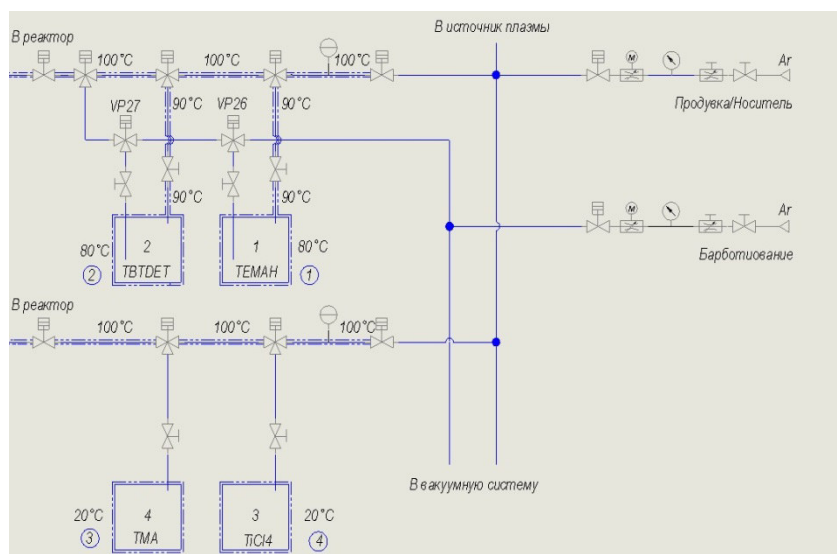


Рис. 4. Схема подготовки и подачи прекурсоров в реактор.

1 – барботер с металлоорганическим прекурсором гафния (ТЕМАН) с низким давлением насыщенных паров, 2 - барботер с металлоорганическим прекурсором тантала (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.

Прекурсоры, в основном металлоорганические соединения, бывают с низким и высоким давлением насыщенных собственных паров. Если давление на поверхности металлоорганической жидкости меньше 133,33 Па, то такой прекурсор называется прекурсором

с низким давлением и для подачи в реактор его необходимо нагревать до температур от 50 до 80 °С. Также для подачи такого прекурсора в реактор необходимо прокачивать инертный газ с определенным расходом через ампулу, в которой этот прекурсор находится. Так как такое пропускание газа имеет название барботирование, то и ампула называется барботером. Если давление на поверхности металлоорганической жидкости больше 133,33 Па, то такой прекурсор называется прекурсором с высоким давлением и для подачи в реактор его необходимо охлаждать до температур от 10 до 20 °С. Пропускание инертного газа (барботирование) через барботер в этом случае не нужно.

II. Глубокое анизотропное травление.

По прогнозам производителей ИС на годы 2020-2025, физические размеры минимальных элементов КМОП будет ниже порога 10 нм. Несмотря на разработку перспективных туннельных транзисторов, становится ясно, что геометрические пределы будут достигнуты в короткие сроки. Поэтому сейчас ведутся активные разработки использования вертикальной оси трехмерного пространства, т.е. возможность укладывать стоки транзисторов друг на друга, и этот 3D подход будет продолжать наращивать количество компонентов на квадратный миллиметр, даже если горизонтальный физический размер больше не будут поддаваться дальнейшему масштабированию.

В наибольшей степени глубокое анизотропное травление актуально для формирования MEMS и TSV структур и для DRAM конденсаторов.

Процесс глубокого анизотропного травления (Bosch-процесс) является двухстадийным и циклическим. На первой стадии (рис. 5) 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 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.

Основное преимущество Bosch процесса являются контролируемый и стабильный профиль травления, достаточная селективность к маске, скорость травления и высокое аспектное соотношение. Основным недостатком – шероховатость стенок вследствие цикличности травления.

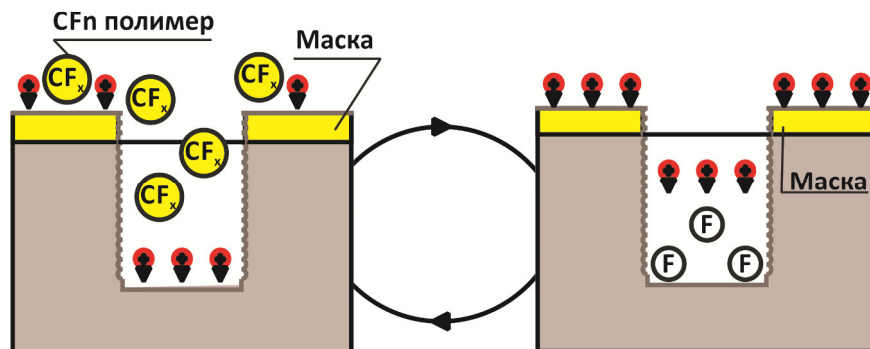


Рис. 5. Схематическое представление последовательности поверхностных реакций, формирующих один цикл Bosch процесса.

Глубокое анизотропное травление отверстий диаметром 13 мкм на глубину 112 мкм проводилось при следующем режиме, 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 ₆	Время, с	
Ar	SF ₆	C ₄ F ₈		Источника плазмы	Столика			C ₄ F ₈	C ₄ F ₈
3	6	2,2	9	500	10	30	260	11	4

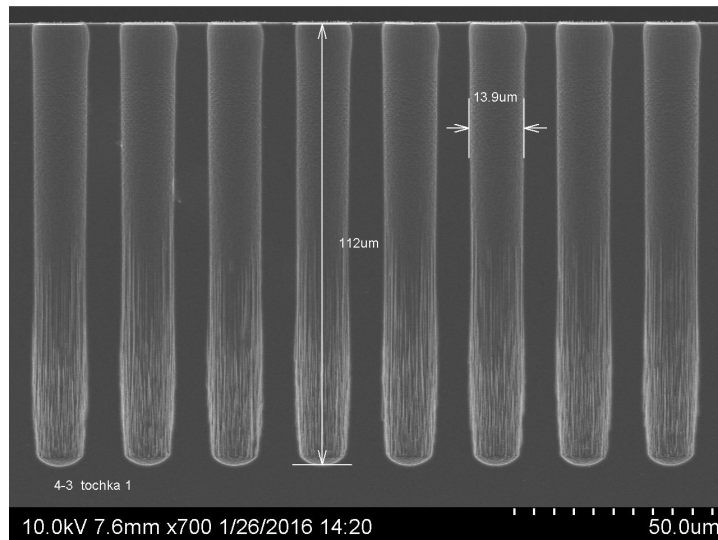


Рис. 6. Травление отверстий диаметром 13 мкм на глубину 112 мкм.

Глубокое анизотропное травление щелей шириной 1,5 мкм при следующих 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 ₆	C ₄ F ₈		Источника плазмы	Столика			SF ₆	C ₄ F ₈
3,6	6	4	9	600	15	50	60	11	4

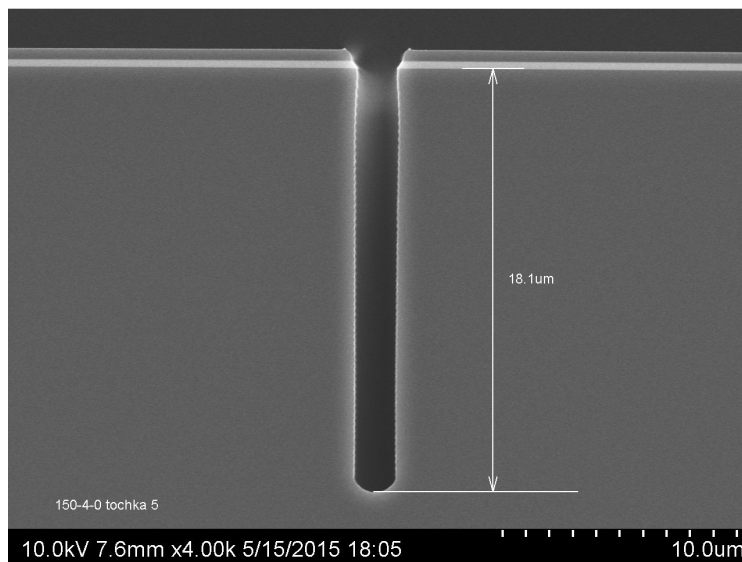


Рис. 7. Травление щелей шириной 1,5 мкм на глубину 18,1 мкм.

На рисунке 8 представлена схема установки глубокого анизотропного травления и поштучной загрузкой пластин диаметром до 200 мм с помощью шлюзовой камеры.

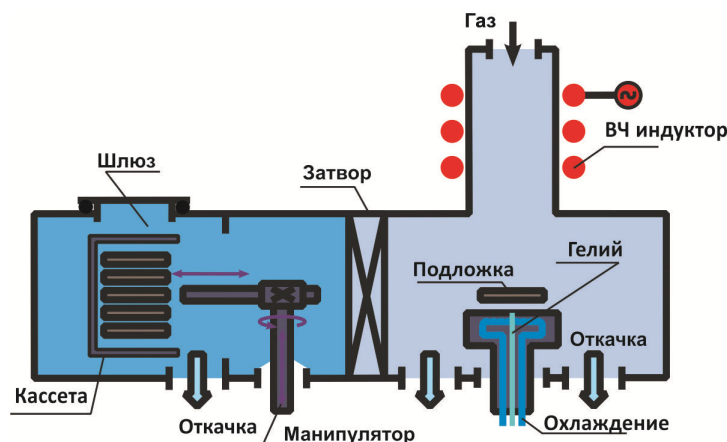


Рис. 8. Схема установки глубокого анизотропного травления и загрузки пластин диаметром до 200 мм с помощью кассетного загрузчика.

III. Формирование мелкощелевой изоляции.

В настоящее время с развитием нанотехнологии, плазмохимическое травление является 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. С момента, как полупроводниковая промышленность достигла критического размера 0,25 мкм, для изоляции элементов применяется технология мелкощелевой изоляции (shallow trench isolation (STI)). С каждым годом полупроводниковая промышленность продолжает уменьшать критические размеры интегральных схем и требования к изоляции элементов становятся все высокими.

Процесс травления кремния с гладкими щелями 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.9).

Основное преимущество процесса травления с гладкими стенками являются 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.

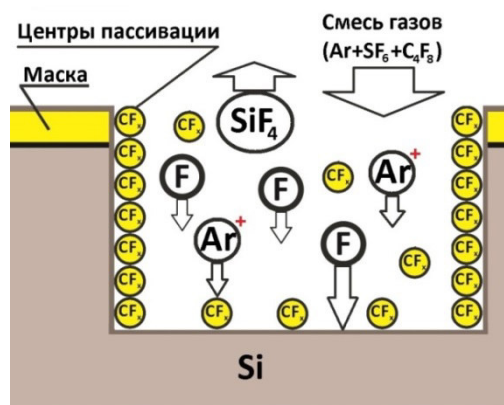


Рис. 9. Схематическое представление поверхностных реакций, формирующих процесс травления с гладкими стенками.

Процесс травления с гладкими щелями, шириной 1,5 мкм, при следующих режима, 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 ₆	C ₄ F ₈		Источника плазмы	Столика		
3,6	4	6	9	600	20	85	450

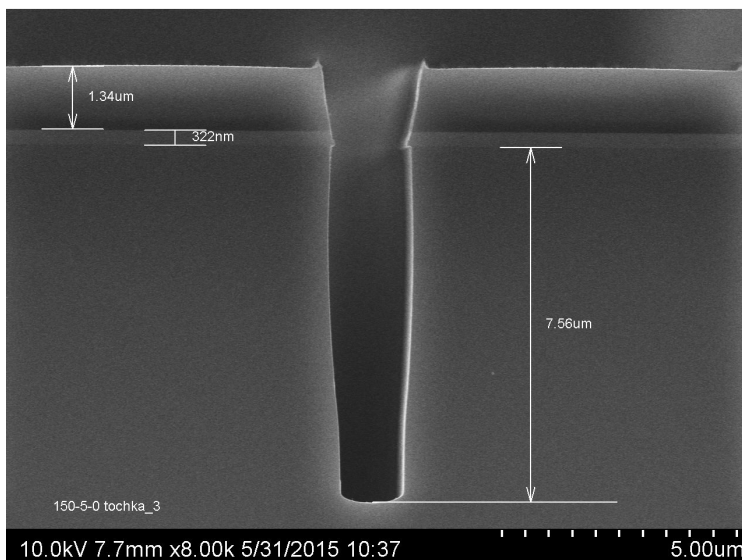


Рис. 10. Травление щелей шириной 1,5 мкм на глубину 7,5 мкм.

На рис. 11 представлена схема установки формирования мелкощелевой изоляции и загрузки пластин диаметром до 200 мм.

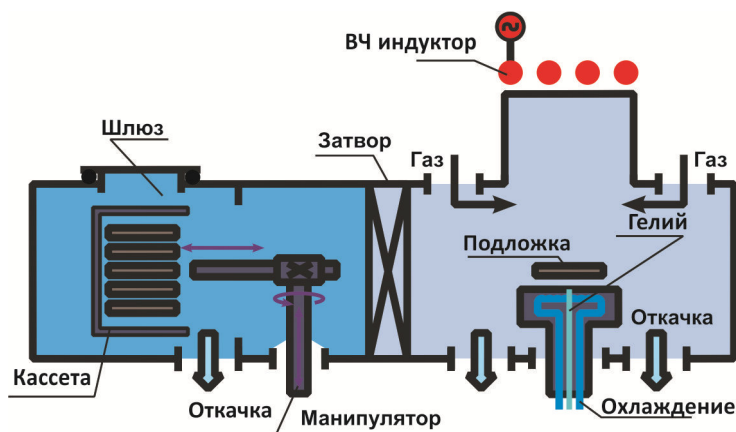


Рис. 11. Схема установки формирования мелкощелевой изоляции и загрузки пластин диаметром до 200 мм с помощью кассетного загрузчика.

IV. Очистка поверхности с использованием СВЧ источника плазмы.

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

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

Удаленная плазма изолирует пластину от ионов и электромагнитных полей. Это уменьшает нежелательные эффекты встроенного заряда, которые могут повредить активные

области микросхемы на пластине. Изотропная обработка происходит с химически активными частицами в отсутствие электромагнитных полей.

СВЧ плазма (2,45 ГГц) по сравнению с ВЧплазмой (13,56 МГц) имеет ряд преимуществ. Микроволновая плазма имеет: более высокую концентрацию нейтральных частиц, более высокие скорости удаления фоторезиста и др. загрязнений и более низкую концентрацию ионизированных частиц, что в свою очередь ведет к меньшему повреждению других слоев, вызванному зарядом, более высокой селективностью травления по отношению к нижележащим и проэкспонированным пленкам.

Нагрев пластины происходит до допустимой температуры пластины <270 °С для предотвращения диффузии ионов в диэлектрические или оксидные слои. В процессе очистки радикалы могут включать в себя: F , Cl , O , H и CF_x , где $x = 1, 2$ или 3 .

Процесс удаления фоторезиста протекает следующим образом: радикалы O перемещаются к поверхности пластины, где происходит их адсорбция (рис. 12). Радикалы O вступают в химическую реакцию с атомом C , с образованием молекулы CO_2 и последующей десорбцией молекулы.

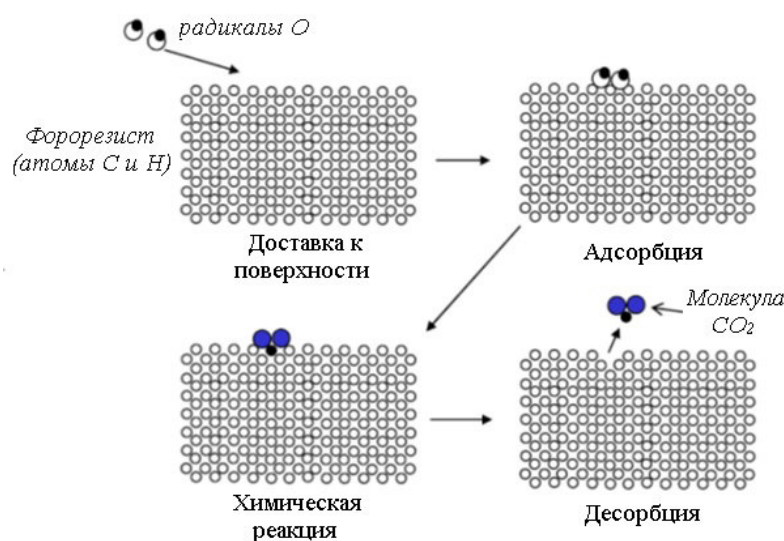


Рис. 12. Схематическое представление последовательности поверхностных реакций, формирующих процесс очистки.

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.

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

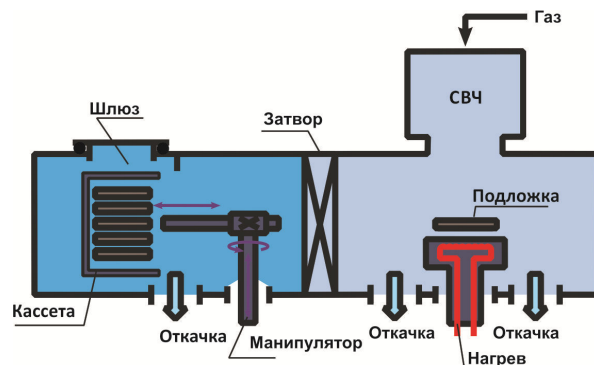


Рис. 13. Схема установки очистки и загрузки пластин диаметром до 200 мм с помощью кассетного загрузчика.

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



Рис. 14. Фото четырех видов установок с загрузкой пластин диаметром до 200 мм с помощью кассетного загрузчика.

Литература

1. Гушин 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 вакуумно нанотехнологического оборудования по критерию заданной производительности/Наноинженерия. 2011. №11. С.7-18.