УДК 539.216.2

ПРИНЦИП МОДУЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕН- НОГО ОБОРУДОВАНИЯ И УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ, РЕАЛИЗОВАННЫЕ НА ЕГО ОСНОВЕ

В. В. Одинокоев, В. В. Панин

*АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»,
Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10*

Представлен модульный принцип создания вакуумно-плазменного оборудования для микро-электронных технологий с использованием различных вариантов загрузки-выгрузки пластин в рабочий модуль (реактор): установки с поштучной ручной загрузкой-выгрузкой пластин, с поштучной загрузкой-выгрузкой пластин из шлюзовой камеры манипулятором, с поштучной загрузкой-выгрузкой пластин манипулятором из кассеты-в-кассету в шлюзовой камере, а также оборудование кластерного типа. Приведены примеры реализации принципа на установках плазмохимического травления.

Ключевые слова: вакуумные установки, интегральные схемы, загрузка-выгрузка пластин, источник плазмы, ВЧ генератор, травление пластин

Сведения об авторах: Одинокоев Вадим Васильевич, д.т.н., профессор, vodinokov@niitm.ru; Панин Виталий Вячеславович, к.т.н., vpanin@niitm.ru

THE MODULAR PRINCIPLE OF VACUUM-PLASMA EQUIPMENT DESIGN FOR PLASMA ETCHING SYSTEMS FOR MICROELECTRONICS

V. V. Odinokov, V. V. Panin

*JSC «Research institute of precision machine manufacturing»
Russia, Moscow, Zelenograd, Panfilovsky prospekt, 10*

In this paper the modular principle of vacuum-plasma equipment design for microelectronic technologies is presented, including various options for loading and unloading of wafers into a working module (reactor): systems with single-piece manual loading and unloading of wafers, with single-piece loading and unloading of wafers from a load-lock by a manipulator, with single-piece loading and unloading of wafers cassette-to-cassette with a manipulator in a load-lock, and cluster type equipment. As an example, the principle is described for the plasma etching systems.

Keywords: vacuum systems; integrated circuits; wafer loading and unloading; plasma source; HF generator; wafer etching

Authors: Odinokov Vadim Vasilyevich, Sc.D., Prof., vodinokov@niitm.ru, Panin Vitaly Vyacheslavovich, Ph.D., vpanin@niitm.ru

Введение

В производстве интегральных схем (ИС) с использованием вакуумных технологий на выход годных ИС существенное влияние оказывает воспроизводимость остаточной газовой среды в вакуумной камере (реакторе), а также исключение попадания на поверхность рабочих пластин инородных частиц (пылинок) при

напуске и откачке рабочего объема реактора. Особенно эти факторы негативно оказывают влияние на выход годных ИС с увеличением уровня их интеграции.

На производительность вакуумных установок в большей степени влияет потеря рабочего времени на откачку вакуумного объема до предельного давления и напуск воздуха для его разгерметизации.

Рис. 1

Варианты модульной компоновки вакуумно-плазменных установок:

- 1 – рабочий модуль; 2 – столик; 3 – пластина; 4 – загрузочный модуль (шлюзовая камера);
5 – манипулятор; 6 – целевой затвор; 7 – модуль транспортирования; 8 – кассета с пластинами

Вопросы улучшения воспроизводимости и повышения производительности в производстве ИС решаются за счёт применения шлюзовых систем загрузки-выгрузки пластин и систем их транспортирования.

Существуют различные варианты загрузки-выгрузки кремниевых пластин в реактор вакуумного технологического оборудования, представленные на рис. 1:

- поштучная ручная загрузка-выгрузка пластин или группы пластин в рабочий модуль – реактор (рис. 1а);
- поштучная загрузка-выгрузка пластин

манипулятором в реактор из шлюзовой камеры (рис. 1б);

- поштучная загрузка-выгрузка пластин манипулятором в реактор из кассеты-в-кассету из шлюзовой камеры (рис. 1в);

- поштучная загрузка-выгрузка пластин манипуляторами в несколько рабочих модулей – реакторов из нескольких шлюзовых камер из кассеты-в-кассету и с использованием СМIF (стандартный механический интерфейс) контейнеров – «кластерная система» вакуумного оборудования (рис. 1г).

Таблица

Варианты модульной компоновки вакуумных установок с точки зрения производительности и выхода годной продукции

№	Вариант модульной компоновки	Производительность	Выход годных
1	Поштучная ручная загрузка-выгрузка пластин или группы пластин в рабочий модуль – реактор (рис. 1а)	низкая	~40 – 60%
2	Поштучная загрузка-выгрузка пластин манипулятором в реактор из шлюзовой камеры (рис. 1б)	средняя	~60 – 70%
3	Поштучная загрузка-выгрузка пластин манипулятором в реактор из кассеты-в-кассету из шлюзовой камеры (рис. 1в)	высокая	~80 – 90%
4	Поштучная загрузка-выгрузка пластин манипуляторами в несколько рабочих модулей – реакторов из нескольких шлюзовых камер из кассеты-в-кассету и с использованием СМIF контейнеров – «кластерная система» вакуумного оборудования (рис. 1г)	высокая	~95 – 98%

Основные характеристики модульного принципа проектирования

В таблице представлены варианты модульного проектирования вакуумных

установок с учётом повышения их производительности и выхода годной продукции.

Поштучная ручная загрузка-выгрузка пластин или группы пластин в рабочий модуль – реактор применяется при обработке

небольших партий пластин, а также при невысоких требованиях к остаточной вакуумной среде (рис. 2). Это оборудование имеет небольшую производительность, так как достаточно много времени тратится на откачку до высокого вакуума рабочей камеры и на разгерметизацию её перед выгрузкой пластин. При вскрытии рабочего модуля (реактора) на атмосферу происходит смена состава газовой среды, что ведёт к невоспроизводимости рабочей газовой среды и создаёт дополнительное образование частиц пыли в камере, что существенно влияет на привносимую дефектность и выход годных ИС.

Рис. 2
Фотография модуля установки с поштучной ручной загрузкой-выгрузкой пластин

Для технологии микроэлектронных производств на пластинах диаметром от 100 до 200 мм необходимо снизить привносимую дефектность и тем самым повысить выход годных изделий. Для этого необходимо применять шлюзовую камеру с расположенным в ней манипулятором,

который транспортирует необработанную пластину в рабочий модуль – реактор и возвращает обратно после обработки. За счёт небольшого времени на откачку и разгерметизацию небольшого объёма шлюзовой камеры увеличивается производительность установки в целом.

В качестве примера по такой схеме была создана установка травления мелкой щелевой изоляции в кремнии, оборудованная поштучной загрузкой-выгрузкой пластин манипулятором в рабочий модуль (реактор) из шлюзовой камеры (рис. 3). При этом рабочий модуль (рис. 2) использовался для стыковки с модулем загрузки-выгрузки из шлюзовой камеры.

Загрузка и выгрузка пластин (13) диаметром от 100 до 200 мм происходит с помощью манипулятора (12) из шлюзовой камеры (1). Предельное давление достигается с помощью средств вакуумной откачки через откачные патрубки (7, 10 и 11). Через затвор (2) манипулятор транспортирует пластину на рабочий стол в рабочем модуле – реакторе (9). Охлаждаемый столик имеет канал подачи гелия (6) под пластину и через согласующее устройство подключён к генератору с частотой 13,56 МГц. Индуктор (4) через согласующее устройство подключён к генератору с частотой 13,56 МГц. Процессные газы подаются в реактор через газовый «душ» (3 и 5). Передача мощности от индуктора в реактор происходит через толстый кварцевый диск. Продукты реакции удаляются средствами вакуумной откачки через откачные патрубки (7 и 10). После завершения технологического процесса манипулятор перемещает обработанную пластину в шлюзовую камеру для её выгрузки

Рис. 3

Схема (а) и фотография общего вида (б) установки травления мелкой щелевой изоляции в кремнии

и загрузки новой необработанной пластины.

На установке реализован процесс травления гладких щелей шириной 1 мкм на глубину 2 мкм в кремниевой пластине (рис. 4). Мощность верхнего генератора не превышала 1000 Вт, а нижнего – 160 Вт.

Процесс проходил при давлении в реакторе от 2 до 5 Па. Продолжительность процесса не превысила 180 с.

Рис. 4

РЭМ-изображение результатов формирования щелей в кремниевой пластине

Для увеличения производительности такого вида оборудования использовалась компоновка по схеме рис. 1в. Применялся загрузочный модуль со шлюзовой камерой с расположенной в ней кассетой из 25 пластин. Манипулятор поштучно транспортирует необработанные пластины из кассеты в рабочий модуль (реактор) и возвращает обратно после обработки (рис. 5).

Загрузка и выгрузка пластин (3) диаметром от 100 до 200 мм происходит с помощью манипулятора (11) из шлюзовой камеры (1) с кассетой (13). Предельное давление достигается с помощью средств вакуумной откачки через откачные патрубки (8, 10 и 12). Через затвор (2) манипулятор транспортирует пластину на рабочий стол в реакторе. Охлаждаемый столик имеет канал подачи гелия (7) под пластину и через согласующее устройство подключён к ВЧ-генератору с частотой 13,56 МГц.

Рис. 5

Схема (а) и фотография общего вида (б) установки глубокого анизотропного травления кремния

Источник плазмы (4) применяется для генерации радикалов и ионов, получаемых при прохождении газа (5) через индуктор (6), подключённый через согласующее устройство к генератору с частотой 13,56 МГц. Продукты реакции удаляются средствами вакуумной откачки через откачные патрубки (8 и 10). После завер-

шения технологического процесса манипулятор перемещает обработанную пластину в шлюзовую камеру для её выгрузки и загрузки новой необработанной пластины.

На установке реализован процесс анизотропного травления отверстий с разным аспектным отношением в кремниевой пластине через фоторезистивную маску толщиной 2,2 мкм (рис. 6). Мощность генератора источника плазмы не более 1200 Вт, а мощность генератора рабочего стола не более 90 Вт. Процесс проходил при давлении в реакторе от 2 до 5 Па. Время подачи травящего реагента SF_6 не превысило 3 с, а осаждающегося реагента C_4F_8 – 6 с. Получены значения неоднородности процесса травления в пределах 2-3 % глубоких отверстий и щелей с большим аспектным соотношением (более 15) и низкой шероховатостью стенок при скорости травления кремния до 5 мкм/мин.

Рис. 6

РЭМ-изображение результатов травления отверстий в кремниевой пластине

Оборудование данного типа и компоненты соответствует производству ИС

Рис. 7

Фотография установок, размещённых в «чистой» комнате

с уровнем технологии ~ 180 нм. Установки удобно встраиваются в производство с «чистыми» комнатами (рис. 7).

Развитие микроэлектронных технологий с увеличением степени интеграции с топологическими нормами 80-40 нм, а в дальнейшем до 20-10 нм на пластинах диаметром 200-300 мм предъявляет к вакуумно-плазменному оборудованию ещё более высокие требования. Во-первых, само оборудование должно размещаться в «чистом» помещении и перенос кассет между установками должен осуществляться в почти герметичных переносных контейнерах (СМИФ). Транспортирование пластин из кассеты-в-кассету должно происходить в вакууме или в «обеспыленной» зоне (боксе).

Перемещение пластин между шлюзовыми системами и рабочими модулями

должно обеспечиваться одним или несколькими манипуляторами, которые располагаются в модуле транспортирования. Манипуляторы при своём движении не должны выделять частицы, которые могут попасть на поверхность пластин. В транспортном модуле поддерживается более низкое давление, чем в рабочих модулях, и этим обеспечивается вакуумная «блокировка» рабочих модулей друг от друга. Этот вид оборудования называется «кластерным».

Управление кластерными установками обеспечивается двухуровневой микропроцессорной системой управления (МСУ). Верхний уровень обеспечивает работу шлюзовых систем, загрузку-выгрузку пластин между кассетами и перемещение пластин в модуле транспортирования и передачу их в рабочие модули. Каждый

рабочий модуль управляется индивидуальной МСУ.

На рис. 1г и 8 изображены схема и фото разработанной кластерной установки четырьмя рабочими модулями.

Рис. 8

Фотография общего вида кластерной транспортной системы

Выводы

В зависимости от требований технологических процессов и уровня топологических норм могут быть различные варианты загрузки-выгрузки пластин в рабочий модуль – реактор специального технологического оборудования для микроэлектронных технологий, а именно: поштучная ручная загрузка-выгрузка, поштучная загрузка-выгрузка из шлюзовой камеры манипулятором, поштучная загрузка-выгрузка манипулятором из кассеты-в-кассету в шлюзовой камере. При этом используются различные модули, что является прогрессивным решением при

создании другого технологического оборудования.

Достигнуты хорошие технологические результаты работы на установках травления мелкой щелевой изоляции в кремнии и глубокого анизотропного травления кремния. Микропроцессорная система управления установками обеспечивает контроль параметров процесса и поддерживает их стабильность согласно установленным значениям. Это обеспечивает хорошую воспроизводимость технологических процессов.

Созданы несколько рабочих модулей: глубокого анизотропного травления кремния, травления мелкой щелевой изоляции в кремнии, очистки пластин от органических загрязнений в СВЧ разряде и атомно-слоевого осаждения. Разрабатываются модули нанесения плёнок в магнетронном разряде (PVD), быстрого термического отжига (RTA), осаждения плёнок из газовой фазы (CVD) и атомно-слоевого травления (ALE). Модули взаимозаменяемы на портах модуля транспортирования установки.

Размещение оборудования данного типа в чистых производственных помещениях позволит повысить производительность и значительно снизить привносимую дефектность на пластины, что приведёт к значительному повышению выхода годных ИС с более высокими требованиями к технологической топологии.

Литература

1. Одинокоев, В.В. Выбор типа вакуумного нанотехнологического оборудования по критерию заданной производительности / В.В. Одинокоев, Ю.В. Панфилов // Наноинженерия. – 2011. – № 11. – С. 7-18.

2. Патент № 2679863C1 Российская Федерация, B25J 9/10, B25J 18/00 (2018.08). Манипулятор для перемещения полупроводниковых пластин: № 2018115100: заявл. 24.04.2018 : опубл. 13.02.2019 / Бирюков М.Г., Аверьянов Е.В., Афонин П.Е., Одинокоев В.В., Павлов Г.Я., Шубников А.В.; заявитель ОАО «НИИ точного машиностроения». – 2 с.
3. Одинокоев, В.В. Технологическое оборудование для глубокого травления кремния, мелкощелевой изоляции, удаления фоторезиста и атомно-слоевого осаждения / В.В. Одинокоев, В.М. Долгополов, П.А. Иракин, В.В. Панин. – Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – № 1. – С. 24-29.
4. Одинокоев, В.В. Новые вакуумно-плазменные процессы и оборудование для микроэлектроники / В.В. Одинокоев. – Вакуумная техника и технология. – 2018. – Т. 28. – № 1. – С. 28-38.

References

1. Odinokov V.V., Panfilov Yu.V. Vybora tipa vakuumnogo nanotekhnologicheskogo oborudovaniya po kriteriyu zadannoy proizvoditel'nosti [The choice of the type of vacuum nanotechnological equipment according to the criteria of the given performance], *Nanoinzheneriya*, 2011, no. 11, pp. 7 – 18.
2. Biryukov M.G., Averyanov E.V., Afonin P.E., Odinokov V.V., Pavlov G.Ya., Shubnikov A.V. Manipulyator dlya peremeshcheniya poluprovodnikovykh plastin [Manipulator for moving semiconductor wafers]. Patent of Russian Federation no. 2679863C1, B25J 9/10, B25J 18/00, (2018).
3. Odinokov V.V., Dolgoplov V.M., Irakin P.A., Panin V.V. Tekhnologicheskoye oborudovaniye dlya glubokogo travleniya kremniya, melkoshchelevoy izolyatsii, udaleniya fotorezista i atomno-sloyevogo osazhdeniya [Technological equipment for deep etching of silicon, final slit insulation, photoresist removal and atomic layer deposition]. *Microwave electronics and microelectronics*, 2018, no. 1, p. 24-29.
4. Odinokov V.V. Novyye vakuumno-plazmennyye protsessy i oborudovaniye dlya mikroelektroniki [New vacuum-plasma processes and equipment for microelectronics]. *Vacuum technique and technology*, 2018, vol. 28, no. 1, pp. 28-38.