

# РЕАКТИВНОЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ ТРАВЛЕНИЕ И ОСАЖДЕНИЕ УСТАНОВКА "КАРОЛИНА 15"

Развитие технологии производства СБИС требует создания принципиально нового вакуумного технологического оборудования, использующего перспективные физические принципы обработки. Для формирования микроструктур с размерами элементов в субмикронной области наиболее перспективны ионно-плазменные процессы, использующие плазму, генерируемую в скрещенных электрическом и магнитном полях [1]. В последние годы повышенное внимание привлекают системы и методы, реализующие ионно-плазменную обработку при использовании резонансных явлений в ВЧ- и СВЧ-плазме [2, 3]. Поэтому большой интерес представляет новая установка реактивного ионно-плазменного травления и осаждения "Каролина 15", отвечающая современным требованиям полупроводникового производства.

В современных вакуумных установках все шире используются источники плазмы высокой плотности на основе ВЧ-разряда, формирующей так называемую "трансформаторно-связанную плазму" (ТСР)\*. ТСР-разряд позволяет травить различные материалы микроэлектроники с высоким разрешением (менее 0,2 мкм) и осаждать слои из парогазовых смесей (плазменно стимулированный CVD-процесс), обеспечивая при этом высокую эффективность и качество проведения процесса [4].

Достоинства ТСР-реакторов – высокая концентрация создаваемой плазмы (порядка  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>); низкий ее потенциал относительно подложки, что характерно для индукционного разряда; возможность независимого регулирования плотности плазмы и энергии ионов подачей отдельного смещения на подложку и высокая равномерность ионного тока на подложку большого диаметра.

Соответствующий источник оригинальной конструкции (антенна) [5–7] был разработан для установки "Каролина 15". Эта установка предназначена для ионно-химического травления специальных материалов, применяемых в производстве изделий микроэлектроники. Травление осуществляется бомбардировкой поверхности изделий ионами и взаимодействием обрабатываемого материала с радикалами технологического газа, образующимися в индукционном ВЧ-разряде.

## КОМПОНОВКА УСТАНОВКИ

Установка "Каролина 15" состоит из вакуумного модуля и стойки управления. На каркасе вакуумного модуля расположена цилиндриче-

\* ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2003, №2, с.54–56.



Е.Берлин, С.Двинин,  
Н.Морозовский, Л.Сейдман

ская рабочая камера (рис. 1). Система вакуумной откачки этой камеры – безмасляная. Откачка до рабочего вакуума и в процессе обработки производится химически стойким турбомолекулярным насосом типа Turbo-V 551 Navigator или аналогичным агрегатом. К нижнему фланцу камеры крепятся патрубок с датчиками вакуума и патрубок с управляемой дроссельной заслонкой и высоковакуумным затвором. Форвакуумная откачка рабочей камеры и камеры шлюза осуществляется агрегатами типа спиральный насос фирмы Anest Iwata.

Газовая система установки состоит из 2–8-канальной системы управления газонапуском на базе регуляторов расхода газа РРГ-10 с запорными клапанами. Расход рабочего газа регулируется в диапазоне от 0 до 0,1 Вт.

## РАБОЧАЯ КАМЕРА УСТАНОВКИ

Вакуумная (рабочая) камера содержит водоохлаждаемый столик, на котором размещаются обрабатываемые подложки диаметром до 200 мм; излучатель ВЧ-мощности (антенну), создающий плазму высокой плотности; устройство лазерного контроля глубины травления; электромагнитную систему, состоящую из двух электромагнитных катушек (рис.2).

Антенна располагается на отдельном фланце сверху рабочей камеры установки и перемещается вдоль продольной оси камеры. Для равномерной обработки подложек (допуск по скорости травления  $\pm 5\%$ ) диаметром до 200 мм требуется антенна диаметром 220 мм. При таком размере антенны равномерность на подложке диаметром 150 мм составляет при травлении термического диоксида кремния  $\pm 1\%$ . Антенна имеет форму цилиндра высотой 50 мм. Она снабжена коаксиальным герметичным подводом ВЧ-мощности и вводами водяного охлаждения. Корпус антенны, отделяющий ее от

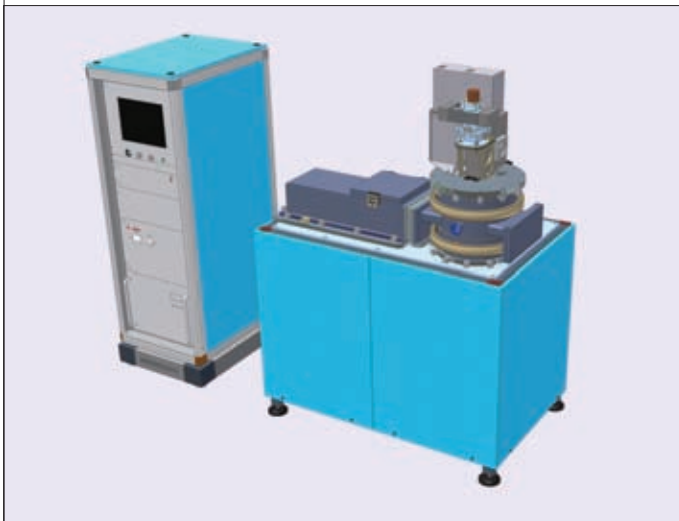
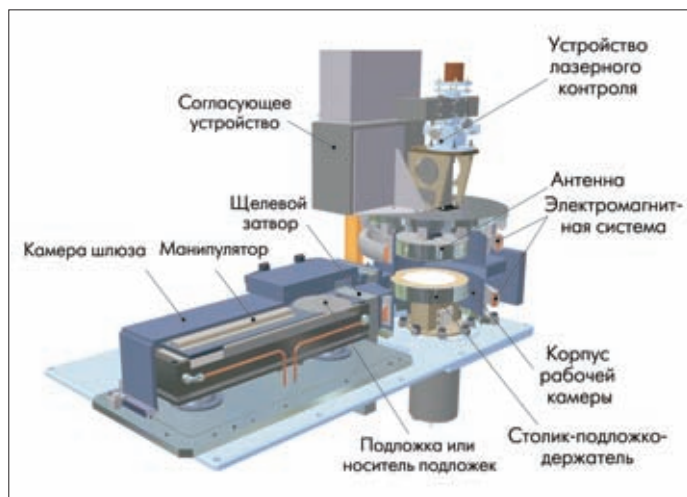


Рис.1. Установка "Каролина 15"



**Рис.2. Рабочая камера установки**

плазмы, изготовлен из кварца толщиной 4 мм. Внутри корпуса расположена водоохлаждаемая спиральная катушка специальной формы, витки которой выполнены из меди. Особенность данной конструкции – вложение спиралей друг в друга, т.е. совмещение их в одном объеме. Это позволило уменьшить габариты антенны и сконцентрировать излучаемую ею мощность. Важное преимущество такой антенны – возможность работы при травлении проводящих материалов практически неограниченное время.

Антенна создает на расстоянии 80–120 мм от обращенной к подложке плоскости своего основания плазму очень высокой концентрации в зависимости от поданной мощности и сорта рабочего газа, например  $1 \cdot 10^{12}$  электрон/см<sup>3</sup> при давлении аргона 0,5 Па и ВЧ-мощности 900 Вт. Диапазон рабочих давлений этого разряда очень широк – от 100 до 0,1 Па и даже менее.

При необходимости еще более повысить плотность плазмы применяется навесная магнитная система в виде двух электромагнитных катушек большого диаметра, установленных вне рабочей камеры. Создаваемые ими магнитные поля способны увеличить плотность плазмы еще на 50–70 %.

Ниже антенны размещается обрабатываемая подложка с диаметром до 200 мм, лежащая на столике-подложкодержателе. Столик электрически изолирован от корпуса установки и имеет электрический вывод из камеры. Без подачи смещения на столик потенциал плазмы составляет всего несколько вольт, поэтому ионы и радикалы, участвующие в обработке подложки, практически не имеют кинетической энергии.

При подаче на столик через устройство согласования ВЧ-смещения промышленной частоты 13,56 МГц на подложкодержателе при наличии плазмы возникает отрицательный потенциал автосмещения относительно корпуса установки. Этот потенциал в зависимости от условий разряда составляет от 20 до 400 В. В этом случае ионы, ускоряющиеся в сторону обрабатываемого объекта, приобретают энергию порядка потенциала автосмещения.

Если же на подложкодержателе подаются прямоугольные импульсы напряжения с частотой 50–100 кГц, то энергия ионов составляет почти удвоенную амплитуду этих импульсов из-за выпрямляющего эффекта на границе плазма–подложкодержатель.

Рассмотренное раздельное регулирование плотности плазмы и энергии ионов, вытягиваемых из плазмы, обеспечивает широкие возможности для выбора оптимальных режимов травления.

Подвод и слив воды (охлаждающей или прогревающей) на подложкодержатель осуществляются через изоляционный шланг длиной не менее 1,5 м.

Сбоку к вакуумной камере присоединен шлюз загрузки-выгрузки изделий. Он имеет клапан выпуска воздуха в камеру шлюза, систему форвакуумной откачки и вакуумный затвор, отделяющий камеру шлюза от рабочей камеры на время проведения загрузки-выгрузки изделий.

### СТОЙКА УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ

Все управление установкой производится со стойки управления, размещенной слева от модуля травления (см. рис.1). Управление осуществляется встроенным компьютером. Программное обеспечение позволяет задавать значительное количество процессов обработки изделий в произвольной последовательности, включая смену рабочих газов, изменение мощности генераторов, подаваемых в антенну и на подложкодержатель, время обработки изделий в каждом процессе.

В стойке размещаются два ВЧ-генератора типа УВ-1 мощностью до 1 кВт и частотой 13,56 МГц. Один используется для питания антенны, другой создает смещение на подложкодержателе. Управление устройствами согласования встроено в генераторы. Значение напряжения смещения столика измеряется и отображается на дисплее установки вместе с остальными параметрами процесса.

“Каролина 15” комплектуется устройством обратного охлаждения для подачи воды или другой охлаждающей жидкости в элементы установки.

Размещается установка в производственном помещении без специального фундамента. Для этого нужна площадь 10 м<sup>2</sup> с учетом движущихся частей, рабочего места оператора и необходимых проходов. Агрегаты типа спиральный насос фирмы Anest Iwata устанавливаются сзади модуля откачки или на техническом этаже.

### ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ТРАВЛЕНИЯ

Установка “Каролина 15” использовалась в различных технологических процессах избирательного травления:

- при травлении слоев термического диоксида кремния скорость травления составляла 0,7 мкм/мин при равномерности не хуже  $\pm 1\%$  на подложке диаметром 150 мм. Селективность травления поликристаллического кремния относительно термического диоксида кремния достигала 1:50. В рассматриваемом случае источником смещения подложки служил генератор с частотой 13,56 МГц;
- при ионном травлении материалов типа КРТ были получены втрое большая скорость и хороший профиль травления по сравнению с ионно-лучевым травлением с помощью сеточного ионного источника Кауфмана. Травление проводилось в среде аргона через маску позитивного фоторезиста. Время травления на глубину 12 мкм не превышало 25 мин. Для подачи смещения на подложку использовался генератор низкой частоты (50 кГц);
- при получении сверхмалых размеров в диэлектрических пленках с помощью электронно-лучевой литографии и последующего травления на установке во фторсодержащей плазме была получена “канавка” шириной 0,1 мкм в пленках (нитрид кремния, диоксид кремния) толщиной 0,25 мкм. При этом низкая энергия ионов, бомбардирующих подложку (не более 120 эВ), позволила получить низкий уровень радиационных повреждений материала подложки (арсенида галлия);
- при травлении алюминия через фоторезистивную маску получены дорожки с субмикронными размерами (0,5 мкм) и вертикальной стенкой.

Для избирательного травления различных материалов установка с рассмотренной антенной уже используется на ряде предприятий: заводах "Сапфир", "Орион", "Светлана", НИИ "Полус" и др.

### ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЛАЗМЕННО-СТИМУЛИРОВАННОГО ОСАЖДЕНИЯ СЛОЕВ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

В настоящее время широкое применение в технологиях микроэлектроники находят процессы газозафазного осаждения диэлектриков и полупроводников с применением плазменной стимуляции процесса осаждения (PCVD). Этот процесс также проводился на установке "Каролина 15".

Суть плазменной стимуляции процесса осаждения покрытий из газовой фазы состоит в том, что плазма создает на поверхности подложки условия, эквивалентные очень высокой температуре, а также ускоряет процессы химического взаимодействия компонентов газовой смеси на поверхности подложки. В силу высокой "энергетики" процесса плазменной стимуляции удается получать соединения из не взаимодействующих в нормальных условиях газовых компонентов, например моносилана и азота.

Снижение рабочей температуры процесса вплоть до комнатной и возможность использовать менее агрессивный газовый состав, например азот вместо аммиака при осаждении нитрида кремния, весьма положительно сказывается на сроке службы систем газонапуска и откачных средств.

На установке "Каролина 15" применялся следующий режим плазменно-стимулированного осаждения слоев из газовой фазы:

Рабочее давление смеси газов .....	0,2 Па
Расход кислорода или азота .....	0,1 Вт
Начальная температура подложек .....	150°C
ВЧ-мощность на антенне .....	300 Вт

В указанном режиме на установке были отработаны следующие технологические процессы нанесения покрытий:

- осаждение диоксида кремния в смеси моносилана с кислородом на кремниевые и сапфировые подложки при температуре процесса не выше 200°C со скоростью до 3 нм/с;
- осаждение диоксида кремния в смеси гексометилдисилоксана с кислородом. Осаждение производилось на сапфировые подложки со скоростью 1 нм/с. Толщина слоев составляла 0,4–0,5 мкм. Слои соответствовали всем требованиям оптических покрытий из этого материала (коэффициент преломления 1,47 и прозрачность 99% в оптическом диапазоне);
- осаждение стехиометрического и нестехиометрического нитрида кремния из смеси моносилана с азотом на полиимидный лак, покрывающий кремниевую подложку, с температурой подложки не выше 150°C;
- показана возможность планаризации рельефа подложки при осаждении диэлектрика с одновременным его травлением.

Равномерность по толщине осаждаемых слоев на подложке диаметром 150 мм была не хуже ±3%.

Опытная эксплуатация установок "Каролина 15" для плазменно-стимулированного осаждения слоев из газовой фазы показала высокую воспроизводимость параметров процесса – скорости нанесения, равномерности и качества наносимых покрытий, что делает подобный процесс перспективным для массового применения в технологиях производства полупроводниковых приборов и многоуровневых ГИС.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Устройства со скрещенными полями и перспективы их использования в технологии микроэлектроники. Вып.2 (1619).– М.: ЦНИИ "Электроника", 1991.

2. Pelletier J., Lagarde T., Durandet A. and Tynelis-Diez K. Distributed ECR Plasma sources: Reactor scale-up and performance.–In: Microwave plasma and its applications. – Ed. by Yury A. Lebedev.–Moscow: The Moscow Physical Society, 1995.

3. Boswell R.W. Very efficient plasma generation by whistler waves near lower hybrid frequency. – Plasma Phys. and Contr. Fusion, vol. 26, No. 10.

4. Perry A.J., Boswell R.W. Fast anisotropic etching of silicon in an inductively coupled plasma reactor. – Appl. Phys. Lett. 55(2), 10 July 1989.

5. Берлин Е.В., Двинин С.А., Михеев В.В. и др. Распределение плотности плазмы в цилиндрической разрядной камере.–Вестник МГУ, 2004.

6. Берлин Е.В., Двинин С.А., Михеев В.В. и др. Двумерные распределения плотности плазмы в газовом разряде низкого давления. – Физика плазмы, 2004, №12, с.1043–1051.

7. Пат. №2171555 РФ. Источник ионов высокой плотности/Берлин Е.В. Приоритет от 06.03.00.

### Вторая Всероссийская конференция "Контрактное производство электроники в России"

Во всем мире происходит неизбежная трансформация рынка электроники, что характеризуется переходом многих предприятий на модель контрактного производства. Поэтому проведение конференции, посвященной проблемам контрактного производства, стало событием своевременным.

За два года, прошедших после первой конференции, рынок качественно изменился: определились позиции и стратегия его участников, сформировались бизнес-альянсы. На второй конференции обсуждались новые возможности и проблемы контрактного производства электроники, реализации новых перспективных проектов, проходил обмен опытом с партнерами. Главными темами докладов стали: контрактное производство полного цикла серийной и массовой продукции, контрактное производство печатных плат в России и за рубежом, организация производственных альянсов.

Интересный доклад, посвященный созданию бизнес-модели контрактного производства, представил сотрудник ЗАО "Компэл" Б. Рудяк. Он сообщил о географическом размещении современного производства, о прогнозах клиентов, которые были представлены российскими, украинскими и европейскими компаниями. Типичный портрет российского заказчика, по мнению выступавшего, – это небольшая компания с заказом от 100 до 10 тыс. единиц товара. Выпускаемая продукция, как правило, сложная, используемая в медицине, телекоммуникациях и т.д. Из-за большого числа новых компаний, создающих неизбежную конкуренцию, руководители огромное внимание уделяют вопросам цены и снижения себестоимости продукции.

Привлек внимание и доклад А. Смагина, представителя производственного альянса "Контракт-Электроника". В альянс входит более двадцати предприятий, занимающихся разработкой, программированием и серийным производством электронной аппаратуры. Это позволяет работать с крупными и мелкосерийными заказами на территории России и за ее пределами. Спектр предоставляемых компанией услуг в области контрактного производства достаточно широк – дизайн, комплектация, изготовление печатных плат, монтажное производство, корпусирование, испытание и тестирование.

Заинтересовала участников работа ООО "Фаствел". Руководство этой компании успешно решило проблему контрактного производства передних панелей и шильдиков на современном и качественном уровне при отсутствии контрагентов по данным направлениям. Компания создала участки по производству этой продукции, приобрела специальное оборудование, отработала технологию, организовала обучение сотрудников. У ООО "Фаствел" большие перспективы как в России, так и за рубежом. В следующем году компания планирует в несколько раз увеличить свое присутствие на рынке контрактной сборки.

Конференция сопровождалась выставкой и презентацией контрактных производителей и заказчиков.