

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА ПРИ ГРУППОВОЙ ОБРАБОТКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

О.Симонов¹

УДК 621.79.02
ВАК 05.27.06

Широкое применение плазменных процессов в микроэлектронике обусловлено их разнообразием: химический состав и давление в камере, мощность и частота генератора электромагнитного поля, конструкция электродной системы варьируются в зависимости от того, какие технологические процессы должны быть реализованы. Одним из таких процессов является удаление фоторезиста после того, как он был использован в качестве маскирующей пленки при проведении осаждения либо травления материала на поверхности полупроводниковых пластин.

Плазмохимическое удаление фоторезиста уже достаточно давно используется в полупроводниковом производстве, однако его техническое совершенствование продолжается. В данной статье речь пойдет об особенностях и преимуществах использования микроволновой плазмы для очистки поверхности по сравнению с ВЧ-плазмой на примере решений, предлагаемых одним из ведущих разработчиков и производителей технологического оборудования для микроэлектронной индустрии.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ УДАЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА

Первоначально общепринятым методом удаления фоторезиста являлось использование жидкостной химии – органических растворителей, таких как ацетон, трихлорэтилен и кетоны, а также водно-щелочных растворов. Несмотря на относительную простоту данного метода, недостаток его применения в промышленных масштабах вполне очевиден: большие объемы жидких токсичных отходов. Проблема их утилизации стала стимулом для разработки альтернативного метода.

Ранние образцы газоплазменных реакторов в системах групповой обработки пластин использовали для возбуждения плазмы ВЧ-генераторы. Поскольку общий принцип построения подобных систем уже хорошо отрабатан, они по-прежнему производятся серийно и применяются достаточно широко. В качестве примера можно привести установки МВУ ТМ ПЛАЗМА 04 (разработка НИИ точного машиностроения, Зеленоград) [1] и ПЛАЗМА-150МТ (разработка НИИ полупроводникового машиностроения, Воронеж) [2]. В настоящее время для ВЧ-генераторов промышленного назначения принята стандартная частота 13,56 МГц. Рабочая камера, как правило, имеет круглое сечение, подходящее для

¹ Компания "Евроинтех", sov@eurointech.ru.

создания в ней коаксиального электромагнитного поля с высокой степенью однородности и удобное для размещения загрузочной кассеты с пластинами.

Однако недостаток ВЧ-плазмы также известен: разогнанные электромагнитным полем ионы способны разрушать тонкие структуры на пластине либо приводить к ухудшению их характеристик. Особенно чувствительны в этом отношении подзатворные слои КМОП-устройств, к однородности толщины и диэлектрической проницаемости которых предъявляются повышенные требования. При современном уровне миниатюризации толщина подзатворных диэлектриков может составлять всего лишь несколько нанометров, и воспроизводимость их свойств критическим образом зависит от воздействия ионов с высокой кинетической энергией. При том, что ВЧ-плазма хорошо подходит для очистки и активации поверхностей на этапе микросборки, возможности ее применения в полупроводниковом производстве следует признать ограниченными.

В дальнейшем разработчики оборудования уделяли значительное внимание системам, основанным на применении СВЧ-генераторов (общепринятый стандарт промышленной частоты 2,45 ГГц) и индуктивно-связанной плазмы (ICP). Среди отечественных систем такого типа можно упомянуть установку ПЛАЗМА-150А, которая была разработана НИИПМ и анонсирована в 2003 году на страницах журнала "ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ" как первая установка плазменного удаления фоторезиста, оснащенная ICP-реактором, произведенная в России [3].

В Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники проводились исследования по применению резонаторного плазматрона в качестве источника СВЧ-плазмы, однако сведения о внедрении подобных систем в промышленное производство отсутствуют [4].

Многие современные системы для удаления фоторезиста, разработанные ведущими зарубежными компаниями, используют микроволновую плазму, однако по большей части они позволяют одновременно обрабатывать только одну пластину. Одиночная загрузка пластин экономически менее эффективна по сравнению с технологией групповой обработки. Помимо очевидных соображений, связанных с пропускной спо-



Рис.1. Установка удаления фоторезиста GIGAbatch 310 M

собностью оборудования, можно также отметить, что робот-манипулятор, предназначенный для переноса пластин из шлюза в рабочую камеру и обратно, представляет собой сложную механическую систему с высокими затратами на техническое обслуживание. Кроме того, такие системы, как правило, требуют для размещения большого пространства в чистых помещениях.

Идеальным решением для полупроводниковой индустрии могла бы стать система групповой обработки пластин в микроволновой плазме. Такой подход реализует компания PVA TePla, выпускающая серию установок GIGAbatch (рис.1). Основным предназначением данной серии является удаление фоторезиста, однако также следует отметить возможность применения этих установок для плазмохимического травления других органических материалов, например полиимида.

ОСНОВНЫЕ ОТЛИЧИЯ МЕЖДУ СВЧ- И ВЧ-ПЛАЗМОЙ

С точки зрения физических процессов, протекающих в плазме, необходимо подчеркнуть кардинальное различие между СВЧ- и ВЧ-генерацией, проявляющее себя в таких параметрах, как плотность заряженных частиц и прямое электрическое смещение (DC Bias в англоязычных материалах).

Плотность заряженных частиц определена как количество свободных электронов в ионизированном газе

на единицу объема. Этот параметр является функцией частоты электромагнитного возбуждения: с ее увеличением растет плотность заряженных частиц. Для стандартных ВЧ- и СВЧ-генераторов (частота 13,56 МГц и 2,45 ГГц соответственно) при одной и той же мощности плотность зарядов различается примерно на два порядка, как представлено на рис.2. Для сравнения также приведены значения для низкочастотного генератора 40 кГц. Как правило, НЧ-плазма применяется для очистки и активации поверхности изделий, менее критичных к ее воздействию по сравнению с кристаллами полупроводниковых приборов.

Высокая плотность зарядов приводит к химической активности СВЧ-плазмы, поскольку свободные электроны, взаимодействуя с частицами рабочего газа, создают высокую концентрацию активных радикалов. Механизм удаления фоторезиста в данном случае имеет ярко выраженную химическую природу: радикалы активно взаимодействуют с органическими материалами, образуя летучие соединения. Поскольку в качестве рабочего газа здесь наиболее часто применяется кислород, этот процесс в целом похож на горение, отличаясь, по сути, лишь тем, что он протекает при значительно более низких температурах (ниже 100°C); в англоязычных материалах он носит название *ashing* (сжигание).

ВЧ-плазма обладает меньшей реакционной способностью. Чтобы добиться сопоставимого эффекта от ее применения, необходимо увеличивать время процесса либо мощность, что зачастую нежелательно в силу ряда причин – к примеру, возможного перегрева изделий. Механизм очистки в данном случае имеет смешанную природу: на сопоставимом уровне с химическими реакциями происходит физическое воздействие на материал, основанное на разрушении связей за счет ионной бом-

бардировки. Для чувствительных структур на поверхности пластины такое воздействие может быть критичным.

Основной вклад при воздействии ионов на подложку вносит прямое электрическое смещение – напряжение, возникающее между электродами плазменного реактора. Оно проявляется в ускоренном движении ионов к электроду противоположной полярности. Являясь производной от целого ряда параметров системы, включая давление и тип рабочего газа, подводимую мощность, частоту генерации и конфигурацию электродной системы, прямое электрическое смещение стало объектом большого числа исследований [6].

Было установлено, что его возникновение обусловлено переносом заряда в темных областях, прилегающих к электродам, при этом увеличение частоты генерации приводит к уменьшению электрического смещения [7]. Примерный вид этой зависимости в логарифмическом масштабе приведен на рис.3.

Можно видеть, что разница прямого электрического смещения для частот 13,56 МГц и 2,45 ГГц является значительной. Дальнейшие исследования показали, что повреждения чувствительных структур, таких как подзатворные диэлектрики КМОП-устройств, в случае применения СВЧ-плазмы пренебрежимо малы и сопоставимы с результатами, получаемыми при жидкостной обработке, в то время как в случае ВЧ-плазмы процентное отношение изделий, получивших критические повреждения, весьма значительно даже при использовании клетки Фарадея для их защиты. Таким образом, мы приходим к выводу, что СВЧ-плазма с ее ярко выраженным химическим характером воздействия на материал обеспечивает "мягкое" травление и идеально подходит для производства изделий с субмикронной структурой. Но этим ее преимущества не исчерпываются.

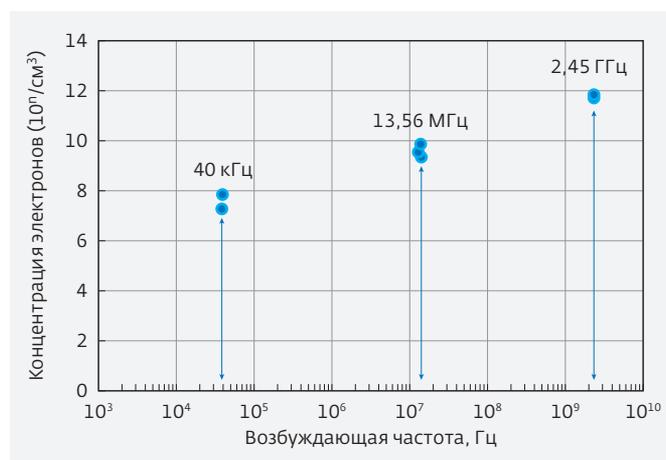


Рис.2. Зависимость концентрации электронов от частоты плазменного генератора

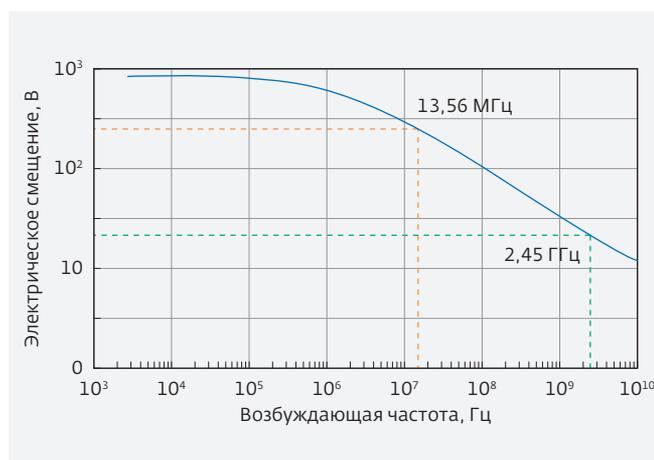


Рис.3. Зависимость электрического смещения от частоты плазменного генератора

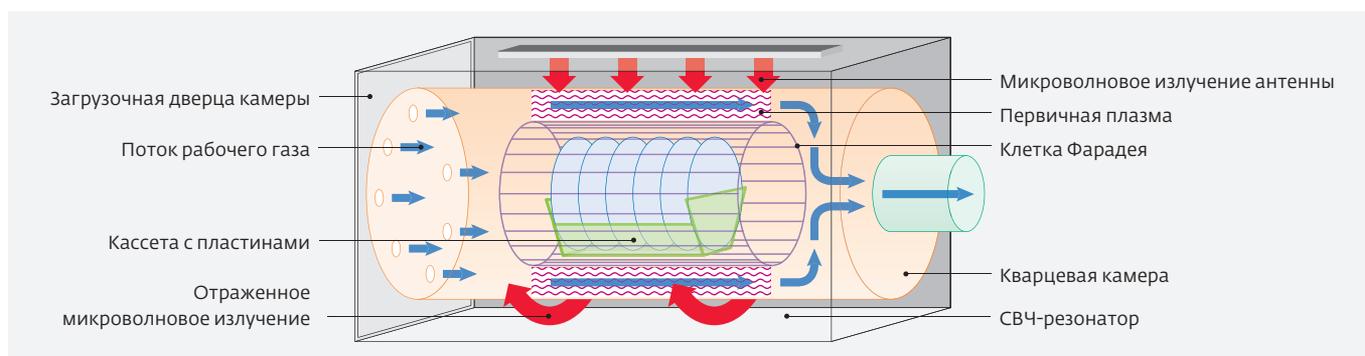


Рис. 4. Концептуальная схема рабочей камеры в установках удаления фоторезиста микроволновой плазмой (групповой процесс)

Полезная особенность СВЧ-плазмы – ее способность проникать в узкие полости, что широко используется в производстве МЭМС. Изотропное травление жертвенного слоя между различными частями этих устройств является ключевым технологическим процессом, обеспечивающим их подвижность.

При комбинированном использовании CF_4 и кислорода СВЧ-плазма позволяет обеспечить эффективное удаление оксидов As и P, образующихся после ионной имплантации, устраняя тем самым остаточное загрязнение пластины этими материалами.

С помощью плазменной активации возможно существенное улучшение гидрофильных свойств поверхности пластин. Эта технологическая операция производится перед жидкостными процессами и устраняет проблему образования микропузырьков, препятствующих взаимодействию реагента с поверхностью.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ УСТАНОВОК УДАЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА, РЕАЛИЗУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЮ СВЧ-ПЛАЗМЫ

Как было отмечено выше, разработки в области применения микроволновой плазмы в полупроводниковом производстве проводились в разных направлениях. На примере оборудования производства компании PVA Terpla рассмотрим, какие конструктивные особенности реализуются в случае групповой обработки пластин.

Одновременная загрузка нескольких десятков пластин обеспечивает высокую производительность и представляет несомненный интерес с экономической точки зрения. На рис. 4 приведено схематическое изображение рабочей камеры, подобной той, которая используется в установках серии GIGAbatch. Внешняя часть камеры представляет собой резонатор, в котором микроволновое электромагнитное поле создается с помощью антенны, генерация осуществляется магнетроном. Внутренняя часть рабочей камеры выполнена из кварца.

Клетка Фарадея, размещенная внутри нее, не является обязательным элементом, но представляет собой полезную опцию для тех применений, где прямое взаимодействие электромагнитного излучения с пластинами нежелательно. Заряженные частицы, которые СВЧ-поле создает снаружи клетки Фарадея, легко проникают внутрь нее через прорези, в то время как само поле экранируется.

Загрузка кварцевой кассеты с пластинами производится таким образом, чтобы исключить непосредственный контакт оператора с внутренней поверхностью камеры: при открытии дверцы из камеры выдвигаются направляющие, на которые ставится кассета; закрытие дверцы перемещает ее внутрь. Такой способ загрузки уменьшает вероятность загрязнения камеры и обеспечивает правильное позиционирование пластин при проведении процесса. Конструкция кассет варьируется в зависимости от диаметра и толщины пластин. Различные модели серии GIGAbatch отличаются в первую очередь по объему загрузки. К примеру, промышленная модель 380M обеспечивает одновременную загрузку до 75 пластин с максимальным диаметром 200 мм.

Подача рабочего газа осуществляется со стороны крышки, а вакуумный порт расположен в задней стенке камеры. Таким образом, поток вещества – рабочего газа и продуктов реакции – имеет направление вдоль оси камеры. Как в большинстве современных плазменных систем, газовая линия оборудована регулятором массового расхода, а давление в камере контролируется вакуумметром.

Точное соблюдение технологических условий требует наличия температурного контроля. Для этого предусмотрен инфракрасный сенсор, расположенный на задней стенке камеры. Измеренное им текущее значение температуры программным образом сопоставляется с заданным значением. Их разница в качестве корректирующего фактора задает автоматическую регулировку мощности плазменного генератора.

Система управления отвечает современным стандартам технологического оборудования: взаимодействие оператора с программной средой производится через графический интерфейс; предусмотрена возможность создания и сохранения многошаговых рецептов; параметры процессов сохраняются с возможностью экспортирования данных. Продуманный дизайн и качество исполнения обеспечены огромным опытом компании PVA Terpla в разработке и производстве технологического оборудования для проведения вакуумных, плазменных и высокотемпературных процессов. Установки серии GIGAbatch могут считаться отличным образцом при сравнительном анализе систем удаления фоторезиста.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимущества микроволновой плазмы, описанные в данной статье, делают внедрение систем, основанных на ее использовании, актуальным для полупроводниковой индустрии.

Большое разнообразие установок плазменной очистки, различных по своему применению, требует внимательного подхода при их выборе. Конструктивные особенности и характеристики плазменных установок, как правило, обеспечивают их идеальное

соответствие только вполне определенному кругу задач.

Понимание физических принципов работы плазменных систем является залогом принятия правильного решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://niitm.ru/мву-тм-плазма-04>
2. <http://vniipm.ru/oborudovanie/product/view/20/34>
3. **Гомжин И., Гликсон Б., Гушин О., Ефремов Д., Лебедев Э., Федоров Н.** Автоматическая установка удаления фоторезиста "ПЛАЗМА 150А" // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2003. № 6. С. 40–41.
4. **Бордусов С.В.** Исследование процесса удаления фоторезиста в послесвечении СВЧ разряда, формируемого в плазматроне резонаторного типа на базе кольцевого волноводно-щелевого излучателя. <http://fep.tti.sfnu.ru/books/conferenc/pem2002/part1/d050-53.pdf>
5. <http://www.pvatepla.com/ru/>
6. **Verdonck P.** Plasma Etching. <https://wcam.engr.wisc.edu/Public/Reference/PlasmaEtch/Plasma%20paper.pdf>
7. **McVittie J.** Tutorial on using RF to control DC Bias, Stanford Nanofabrication Facility Stanford University. http://www.avsgroups.org/pag_pdfs/PEUG_07_5_McVittie.pdf

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 2600 руб.

ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ТРЕХМЕРНАЯ ПЕЧАТЬ, БЫСТРОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ И ПРЯМОЕ ЦИФРОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б.

При поддержке Департамента станкостроения и инвестиционного машиностроения Минпромторга России

Перевод с англ. под ред. д.ф.-м.н. профессора Шишковского И.В.

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 656 с.
ISBN 978-5-94836-447-6

Книга посвящена новейшим технологиям, которые дают возможность на основе данных о виртуальных моделях твердых тел изготавливать физические модели в результате быстрых и легких производственных процессов.

Авторы книги – признанные специалисты в области аддитивных технологий, имеющие многолетний опыт работы и исследований. Первое издание задумывалось как базовый учебник, объединивший все литературные источники, посвященные целям и задачам аддитивного производства (АП). Второе издание существенно переработано и дополнено, новая информация включена в дополнительные разделы и главы.

Разработчики АП и представители промышленности найдут полезные сведения в этой книге, поскольку она поможет понять состояние дел в отрасли и укажет возможности для дальнейших исследований. Издание предназначено также для преподавателей, студентов и аспирантов, изучающих аддитивное производство, может быть использовано в качестве автономного курса или как модуль в большой программе по технологии производства.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; 📠 (495) 956-3346; knigi@technosphaera.ru, sales@technosphaera.ru