



УДК 66.06 : 621 : 776.1

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.539.542

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЛАСТИН В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЭМС И МИКРОСБОРОК И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

TECHNOLOGICAL FEATURES OF TECHNOCHEMICAL WAFER PROCESSING IN TECHNOLOGICAL PROCESS OF MANUFACTURING MEMS AND MICROASSEMBLIES AND PROMISING DESIGN SOLUTIONS FOR THEIR IMPLEMENTATION

ТУПИКИН ВЯЧЕСЛАВ ФЕДОРОВИЧ

TUPIKIN VYACHESLAV F.

ГЕРАСИМЕНКО ЮЛИЯ ВЛАДИМИРОВНА
yuliya-gerasimenko@yandex.ruGERASIMENKO YULIYA V.
yuliya-gerasimenko@yandex.ru

ЕРМАКОВА АЛЕКСАНДРА СЕРГЕЕВНА

ERMAKOVA ALEXANDRA S.

КОМАРОВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

KOMAROV NIKOLAI V.

КОМАРОВ ВАЛЕРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

KOMAROV VALERIY N.

СЕРГИЕНКО АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ

SERGIENKO ANATOLY I.

ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводникового машиностроения»
394033, г. Воронеж, Ленинский просп., 160а

Open Joint-Stock Company "Scientific Research Institute of Semiconductor Mechanical Engineering"
160a Leninsky Ave., Voronezh, 394033

Рассмотрены особенности процессов объемной и поверхностной химической обработки пластин и формирование фоторезистивной маски при создании МЭМС. Определены требования, предъявляемые к технологическому оборудованию. Представлены конструктивные решения специального технологического оборудования для изготовления МЭМС.

Ключевые слова: МЭМС; технология; химическая обработка; фотолитография; особенности.

The paper considers features of bulk and surface chemical processing of plates and the formation of a photoresist mask in the creation of MEMS. The requirements for technological equipment have been determined. The design solutions of special technological equipment for manufacturing MEMS have been presented.

Keywords: MEMS; technology; chemical treatment; photolithography; features.

С 1988 г. технология изготовления МЭМС продвинулась от этапов первых разработок и становления до серийного массового производства и широкого применения в различных отраслях науки и техники. Развитие технологии изготовления МЭМС подчиняется закону Мура, который от области интегральных схем может быть распространен на область микроэлектромеханических систем, следуя тенденции усложнения устройств от датчика давления к микрозеркалу (DMD) (рис. 1). В настоящее время МЭМС-устройства широко применяются в космических аппаратах, автомобилестроении, медицине, в мобильных устройствах и бытовой технике [1].

Технология изготовления МЭМС использует принципы, подходы, методы и оборудование, разработанные для технологии производства интегральных схем. Особенностью производства микросистем является одновременное создание на поверхности пластины множества механизмов без использования сборочных операций.

Основными технологическими процессами, используемыми при производстве МЭМС, являются объемная и поверхностная микрообработка, а также LIGA-технология. В ходе объемной химической микрообработки процесс идет от поверхности кремниевой пластины вглубь. Основным достоинством техпроцесса является формирование интегральных элементов микросистемной техники селективным травлением на последнем этапе процесса изготовления. Для формирования элементов МЭМС пластина погружается в ванну химических травителей (либо обработка производится методом полива), которые удаляют незакрытые фоторезистом участки технологических слоев, формируя МЭМС [2]. Различают передностороннюю, задностороннюю микрообработку и комбинированный метод. В ходе передносторонней объемной микрообработки производится селективное травление лицевой стороны пластины. В качестве маски травления могут быть использованы металлизированные и пассивирующие слои. Задносторонняя микрообработка основана на травлении подложки

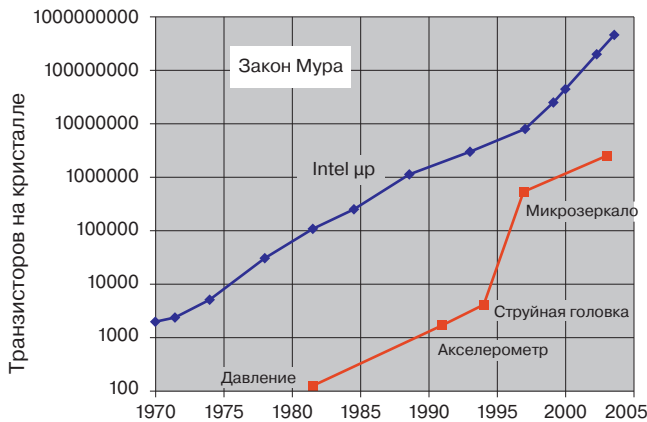


Рис. 1. Закон Мура в МЭМС [1]



Рис. 2. Технологическая позиция установки химической обработки УХО-153

с задней стороны, причем травление может быть выполнено двумя способами. Первый способ заключается в нанесении эпитаксиального слоя (стоп-слой) на лицевую сторону пластины и дополнительном маскировании задней стороны подложки. После этого травление задней стороны выполняется до стоп-слоя. Такая технология позволяет стравливать до нескольких сотен микрометров и формировать элементы с малой толщиной. Второй способ заключается в использовании управляющих отверстий, создаваемых с передней стороны подложки и определяющих толщину создаваемых элементов, и дополнительного маскирования задней стороны пластины. Травление останавливается, когда передносторонние управляющие отверстия становятся видимыми. Данный метод позволяет формировать элементы с большой толщиной. Травление в ходе микрообработки может быть как изотропным, так и анизотропным [3]. Технология объемной микрообработки является сравнительно простой и недорогой.

Поверхностная микрообработка позволяет изготавливать сенсорные и актюаторные элементы микросистем меньшей толщины, чем аналогичные структуры, изготовленные с использованием объемной микрообработки. Поверхностная обработка состоит из большего числа технологических операций, чем объемная, и является более сложным методом. Она заключается в наращивании слоев материала на кремний. Процесс представляет собой последовательное нанесение на поверхность пластины тонких пленок, формирование на пленке защитного рисунка методом фотолитографии и химическое травление пленки. Чтобы создать подвижные, функционирующие механизмы, в слоях чередуют тонкие пленки конструкционного материала (обычно это кремний) и заполнителя

(как правило, двуокись кремния). На финальном этапе заполнитель вытравливают плавиковой кислотой. Важным фактором при травлении являются анизотропные свойства подложки [2]. Технология LIGA (Litographie, Galvanoformung и Abformung) включает процессы литографии, гальванопластики и формовки и подходит для создания элементов с высоким аспектным соотношением [2]. Данная технология позволяет с высокой точностью создавать трехмерные элементы с вертикальными боковыми сторонами толщиной до 100–1000 мкм и поперечными размерами в пределах нескольких микрон. Для достижения большой высоты элементов используется толстый слой резиста, наносимый на подложку [3].

Процессы объемной и поверхностной микрообработки в той или иной степени включают операции жидкостной химической обработки, а именно химическую очистку поверхности пластин, активацию поверхности, химическое и электрохимическое осаждение, изотропное и анизотропное травление и химическое удаление фоторезистивных масок. Данные процессы могут осуществляться для группы пластин и реализовываться в виде индивидуальной обработки. Наличие мировой тенденции к индивидуальной обработке пластин в продукции компаний Obducat (Германия), M-O-T GmbH (Германия), Idonus (Швейцария), MEI Wet Processing Systems and Services LLC (США), RAMGRABER (Германия), SPS-Europe (Нидерланды), Agias GmbH (Германия), S.P.M. s.r.l. SPECIAL PLASTIC MODULE FOR SEMICONDUCTOR INDUSTRY (Италия), Class One (США), Veeco (США), INNO-MAX Co. Ltd. (Южная Корея), Jaesung Engineering Co. (Южная Корея), TEL-NEXX (Япония) и др. показывает, что конструктивные решения процесса обработки могут быть самыми разнообразными: полив, погружение, спрей. Касательно современного оборудования индивидуальной химической обработки следует отметить оборудование для односторонней обработки пластин методом полива, производимое фирмами SPM (Италия), INNO-MAX Co. Ltd. и Jaesung Engineering Co. (Корея), и оборудование для индивидуальной обработки пластин погружным методом фирмы ClassOne (США).

ОАО «НИИПМ» также неоднократно применяло в оборудовании конструктивные решения для односторонней индивидуальной химической обработки пластин и фотошаблонных заготовок: например, на этом принципе построена серия установок химической обработки УХО-153 (рис. 2). Это оборудование предназначено для выполнения следующих технологических операций на фотошаблонных подложках: проявление фоторезиста, травление маскирующего слоя, удаление фоторезиста, двухсторонняя промывка деионизованной водой, сушка центрифугированием. Многоуровневая система управления установкой позволяет проводить непрерывный мониторинг технологических параметров и осуществлять диагностику состояния механизмов и систем. Все вышеуказанные операции выполняются на одном рабочем месте (центрифуга). Подача растворов струйная со сканирующей форсункой. Кроме работы с кислотами создавалось аналогичное оборудование для работы с органическими реагентами.

Данный способ обработки (индивидуальная обработка на центрифуге поливом) позволяет получить хорошую воспроизводимость результатов обработки и высокое качество, т. к. подложки обрабатываются в абсолютно одинаковых условиях (свежий раствор, идентичные режимы обработки, постоянство температуры обработки и т. д.). Расход рабочего раствора зависит от толщины обрабатываемого слоя, размера пластины/подложки, минимального размера элемента топологии и материала слоя. Для каждого применяемого раствора предусмотрены отдельные легкоъемные стандартные емкости, в процессе работы осуществляются термостабилизация растворов, контроль количества раствора в емкости и контроль



температуры раствора. Благодаря возможности изменения температуры растворов можно изменять время процесса травления.

Такой способ химической обработки наиболее перспективен по сравнению с методом обработки погружением в ванне, т. к. после обработки каждой пластины/подложки концентрация раствора в ванне меняется и, естественно, время обработки подложек тоже будет изменяться. Этот факт для автоматизированной обработки очень неприятен, т. к. необходимы соответствующие дозирующие устройства для поддержания необходимого состава рабочего раствора и хорошего качества обработки. Кроме того, появляется необходимость в наличии ванны для проведения операции промывки и возникают проблемы сушки подложки после промывки. В итоге кажущаяся экономия рабочего раствора оборачивается другими проблемами.

Расход реагентов на одно обрабатываемое изделие увеличивается в сравнении с погружными процессами, но не намного. В целях уменьшения расхода реагентов в оборудовании индивидуальной химической обработки применена система пульсирующей подачи реагентов в процессе обработки, что позволяет значительно уменьшить расход реагентов при обработке.

Общая концепция ведущихся ОАО «НИИПМ» исследований в области оборудования индивидуальной химической обработки заключается, во-первых, в создании нескольких типов технологических позиций обработки, это позиции для обработки пластин/подложек поливом (на центрифуге), погружением — как в открытом реакторе, так и в герметичном, а во-вторых, в формировании из этих технологических позиций оборудования с различной производительностью, от модулей до кластеров с роботизированной транспортной системой. Конструктивные особенности каждого типа реактора определяются технологическими операциями, для реализации которых он спроектирован, что принципиально важно при проведении процессов объемной и поверхностной микрообработки при производстве МЭМС. Должна быть реализована возможность поочередного заполнения реактора с закрепленной в нем пластиной растворами различных реагентов или промывочной воды. Это позволяет достичь высокой повторяемости химического процесса для каждой индивидуально обрабатываемой пластины за счет обновления порций растворов химических реагентов. Такие ключевые параметры конструкции разрабатываемой установки, как наличие сменных держателей для разных диаметров пластин, а также для химических и электрохимических процессов, возможность вращения пластины, возможность наложения на раствор в реакторе мегазвукковых колебаний для, например, интенсификации процессов очистки или травления и высокотехнологичная система управления образуют современную систему химической обработки пластин, предназначенную для использования при создании опытных образцов и небольших партий МЭМС и интегральных схем.

Процесс фотолитографии строится на последовательном проведении стадий нанесения, экспонирования и проявления фоторезиста. При проектировании и создании МЭМС и микросборок применяется технология использования жертвенных слоев, толщина которых определяет величину зазора между отдельными элементами микросистемы. Одним из видов жертвенных слоев выступает фоторезист, наносимый на оборудование фотолитографии. Высокая степень равномерности толщины слоя фоторезиста по поверхности пластины и низкая степень дефектности пленки являются положительными результатами, достигаемыми в ходе нанесения резиста методом центрифугирования. Научный подход при разработке технологических процессов фотолитографии для изготовления МЭМС и микросборок определяется выбранными конструктивными решениями технологического оборудования: достигаемым уровнем надежности конструкции, точностью центрирования пластин, плавностью регулирования

подачи реагентов и т. д., которые определяют перспективность, важность и актуальность ведущихся в ОАО «НИИПМ» разработок.

Технологический процесс производства МЭМС строится исходя из требований к готовому продукту, которые, в свою очередь, определяют выбор фоторезиста. В настоящее время на рынке представлено множество марок фоторезиста от разных фирм, отличающихся чувствительностью, контрастностью, вязкостью и стойкостью к широкому спектру травителей. Для нанесения жидкого фоторезиста, который представляет собой раствор с полимерным содержимым, существуют две методики: центрифугирование и распыление спреем. После нанесения фоторезист подвергается дополнительной сушке при температурном режиме, выбранном производителем. После проведения экспозиции пленку фоторезиста, нанесенную на подложку, помещают в раствор проявителя (обычно это слабощелочные растворы с рядом присадок) и выдерживают некоторое время, определяемое его концентрацией и растворимостью экспонированного фоторезиста. После этого подложку с фоторезистивной маской промывают в деионизованной воде и сушат с помощью струй теплого воздуха или центрифугирования [4]. Особенностью фотолитографического процесса для МЭМС является использование специфических фоторезистов, образующих толстые пленки, предназначенные для формирования элементов топологии с высокими аспектными отношениями и устойчивые в растворах травителей. В качестве таких резистов можно отметить позитивные резисты ФП-25 (ЗАО «Фраст-М»), AZ III XFS (AZ Electronic Materials), ma-P 1200 (Microresist Technology), MEGAPOSIT SPR 220 (Dow) и негативные резисты AZ 15nXT (AZ Electronic Materials), AZ 125 nXT (AZ Electronic Materials), KMPR 1000 (Microchem). Экспонирование этих резистов осуществляется излучением с длиной волны 300–400 нм (*i-g*-линия).

Параметры приборов, изготовленных на одной подложке, оказываются наиболее близкими, однако количество изготавливаемых устройств ограничено площадью поверхности пластины. По мере развития технологий отмечается стремление к увеличению площади поверхности пластины [5]. Отечественное оборудование фотолитографии представлено полуавтоматическими установками ОАО «НИИПМ» НФ-150П, НФТО-150П, предназначенными для обработки пластин диаметром от 50 до 150 мм, линией формирования фоторезистивных пленок ЛНФА-150, позволяющей формировать фоторезистивные пленки на пластинах диаметром 76–150 мм, установкой кластерного типа, способной проводить операции формирования фоторезистивной маски в автоматическом режиме на пластинах диаметром 150 и 200 мм.

Рассматривая зарубежное оборудование фотолитографии, следует отметить в качестве перспективного направления переход к пластинам диаметром 300 мм. Как правило, такие установки имеют кластерную платформу.

Оборудование Amcoss — Facilitating Innovation представлено на рынке системами автоматического нанесения, сушки и проявления фоторезиста Amcoss AMC 1000, Amcoss AMC 2000, Amcoss AMC 2500, предназначенными для работы с пластинами диаметром от 50 до 300 мм. В данных системах полностью реализован принцип мобильности кластерной платформы: имея три, пять или шесть процессных модулей соответственно (чаши, нагревательные/охлаждающие плиты), системы могут существенно отличаться по функциональным характеристикам в зависимости от комбинации модулей. Ввиду большого числа процессных модулей и для обеспечения быстрого и эффективного перемещения пластины по технологическим позициям система Amcoss AMC 2500 оснащена двумя двухзвенными манипуляторами. При этом системы Amcoss AMC 1000 и Amcoss AMC 2000 имеют меньше технологических модулей



Рис. 3. Позиции нанесения фоторезиста: а) оборудование Sawatec iSpray-300; б) оборудование Suss ACS300 Gen2 с крышкой GYRSET; в) оборудование ОАО «НИИПМ»

и поэтому оборудованы одним двухзвенным манипулятором. Имеющаяся тенденция гибкости конфигурации, являющаяся отличительной особенностью продукции компании Amcoss, позволяет без существенных дополнительных разработок изготовителю подстраивать кластер под индивидуальные требования конкретного технологического процесса.

Метод спреевого нанесения фоторезиста реализуется в установке Sawatec iSpray-300 (Sawatec, Швейцария), предназначенной для обработки квадратных и круглых подложек и пластин размером до 300×300 мм. Загрузка пластин и подложек осуществляется вручную. Такая установка наиболее подходит для применения в НИОКР-подразделениях и небольших производствах МЭМС. Система позволяет наносить фоторезист на поверхность глубокой развитой топологии. Специальная форсунка гарантирует минимальные размеры капли резиста (форсунка Micro 0,3 мм), обеспечивая однородное покрытие по всей площади подложки (рис. 3а).

Также спрей-системы нанесения резиста на пластины диаметром до 300 мм (включая квадратную подложку до 200×200 мм) выпускает фирма ATMGROUP. Установка OPTICoat ST30i, оснащенная запатентованной микроспреем-насадкой, вместе с закрытой технологической камерой и апробированной системой выхлопа позволяет получить однородные покрытия на структурах с высокой топологией. Возможность сканирования поверхности спрей-насадкой реализуется по осям X и Y. Также имеется возможность нанесения резиста центрифугированием.

Автоматизация процессов передачи пластины по технологическим позициям модульной установки значительно увеличивает производительность и позволяет реализовать крупносерийное производство. Производимая Suss ACS300 Gen2 имеет гибкую кластерную систему и может работать с пластинами диаметром 200 и 300 мм без механической замены. Высокая точность процесса формирования маски фоторезиста определяется оптической системой центрирования пластин. Толщина пленки фоторезиста составляет от 1 до 100 мкм и более. Особенностью систем Suss является использование запатентованной системы GYRSET, которая обеспечивает высокую однородность слоя резиста даже на очень больших пластинах. Процесс нанесения фоторезиста с закрытой вращающейся крышкой по технологии GYRSET позволяет создать не содержащую завихрений среду, насыщенную растворителем, над подложкой в процессе нанесения резиста, что значительно уменьшает воздействие температуры и влажности окружающей среды на результаты обработки. При вращении пластины воздух над ней вращается с той же скоростью, а его малый объем насыщен растворителем (рис. 3б). Все вместе это обеспечивает высокую равномерность слоя фоторезиста даже на краях прямоугольных подложек.

Разрабатываемое ОАО «НИИПМ» оборудование позволяет наносить резист методом центрифугирования на пластины диаметром 150 и 200 мм: пластина закрепляется на вакуумном столике, после чего

на нее подается раствор фоторезиста при медленном вращении. После распределения резиста по поверхности пластины скорость вращения увеличивается, при этом излишки полимера сбрасываются. Далее производится отмычка краевого валика. Модуль нанесения имеет два канала для подачи двух разных фоторезистов, а также оборудован устройством центрирования пластин (рис. 3в).

Высокое качество операции проявления гарантируется специфической формой подающей капельницы. Подача проявителя производится при небольшом зазоре, на который капельница подходит к поверхности, путем сканирования. При этом пластина вращается с невысокой скоростью. Таким образом, практически исключается действие сил поверхностного натяжения и влияние существующего на пластине рельефа: поверхность полностью смачивается раствором. В перспективе разработка как кластеров в различной конфигурации, так и различных модулей, способных работать автономно для выполнения заданных операций, в том числе с применением различных способов нанесения резиста.

Компактное оборудование, представленное модулями нанесения и проявления фоторезиста, подходит для создания небольших, чаще экспериментальных, партий микроэлектромеханических устройств. Такие установки просты в работе и в обслуживании. Переход к кластерным линиям позволяет автоматизировать процесс формирования фоторезистивной маски. Все операции производятся в атмосфере кластера, что приводит к уменьшению влияния загрязнений из внешней среды и снижает влияние человека на техпроцесс. Также преимуществом кластерных линий является скорость процесса обработки. Автоматизация передачи пластины и близкое расположение технологических модулей и плит позволяют быстро сформировать маску высокого качества.

Разработка современного и высокотехнологичного оборудования для химических и фотолитографических операций, входящих в технологический процесс производства МЭМС и микросборок, является актуальной и стратегически важной задачей в части импортозамещения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ko Wen H. *Trends and frontiers of MEMS// Sensors and Actuators A*. Vol. 136. 2007. P. 62–67.
2. Технологии МЭМС / РадиоЛоцман. — Июнь 2012. — С. 21–24.
3. Лысенко И. Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. — 103 с.
4. Гуртов В. А., Беляшев М. А., Бакшеева А. Г. Микроэлектромеханические системы: Учеб. пособие // Петрозаводск: Из-во ПетрГУ, 2016. — 171 с.
5. Лунякина Т. А. Электронная литография как наиболее инновационный метод литографии // Форум молодых ученых, № 5 (21).