



НОВЫЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ТЕХНОХИМИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МЭМС И МИКРОСБОРОК

NEW DESIGN AND TECHNOLOGY OF WET PROCESSING OPERATIONS OF MEMS AND MICROASSEMBLY FABRICATION

УДК 66.06

ГЕРАСИМЕНКО ЮЛИЯ ВЛАДИМИРОВНА¹

yulia-gerasimenko@yandex.ru

GERASIMENKO YULIYA V.¹

yulia-gerasimenko@yandex.ru

СЕРГИЕНКО АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ¹SERGIENKO ANATOLY I.¹ЕРМАКОВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ¹ERMAKOV ALEXANDER N.¹ЕРМАКОВА АЛЕКСАНДРА СЕРГЕЕВНА¹ERMAKOVA ALEXANDRA S.¹ВЕРТЯНОВ ДЕНИС ВАСИЛЬЕВИЧ²VERTYANOV DENIS V.²

¹ *ОАО Научно-исследовательский институт
полупроводникового машиностроения
394033, Воронеж, Ленинский проспект, 160а
Тел.: +7 (473) 250-25-81, +7 (473) 223-20-46,
+7 (473) 223-04-57
nto-niipm@mail.ru*

² *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*

¹ *“Research Institute of Semiconductor
Machine Building” JSC
160a Leninskiy Ave., Voronezh, Russia, 394033
Tel.: +7 (473) 250-25-81, +7 (473) 223-20-46,
+7 (473) 223-04-57
nto-niipm@mail.ru*

² *National Research University of Electronic Technology
1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*

Современные микроэлектромеханические системы (МЭМС) представляют собой миниатюрные сложные устройства, выполненные по технологии объемной микромеханики. Каждый этап технохимической обработки в процессе изготовления МЭМС: очистка, отмывка, травление, осаждение металлических покрытий — предполагает наличие определенных требований к чистоте проводимых операций и к размерам объектов микромашин. Проведение операций технохимии на традиционном оборудовании групповой обработки имеет некоторые недостатки, к которым относят неравномерность обработки пластин из-за их взаимного близкого расположения, накопление загрязнений в рабочем растворе с возможным последующим загрязнением обрабатываемых пластин, снижение концентрации рабочего раствора при обработке серии пластин. Разработка российского оборудования индивидуальной обработки пластин и подложек для осуществления операций технохимической обработки при изготовлении МЭМС и микросборок является актуальной задачей, требующей новых конструкторских и технологических решений, отвечающих требованиям и особенностям технологического процесса изготовления МЭМС и оптимизированных с точки зрения энергопотребления, габаритов, расхода реактивов и т. п.

Ключевые слова: реактор; индивидуальная обработка; технохимия; микроэлектромеханические системы (МЭМС); микросборка; эффективность.

Modern microelectromechanical systems are miniature complex devices made using the technology of three-dimensional micromechanics. Each stage of wet processing in the MEMS fabrication: cleaning, washing, etching, plating — presupposes certain requirements for the purity of the operations and for the size of the micromachines objects. Conducting wet processing operations on traditional group processing equipment has some drawbacks, which include uneven processing of wafers due to their physical proximity, the accumulation of contaminants in the working solution with possible subsequent contamination of the treated wafers, a decrease in the concentration of the working solution when processing a series of wafers. The development of Russian equipment for the single wafers and substrates processing for the implementation of wet treatment operations in the MEMS and microassemblies fabrication is an important goal, which requires new design effort and technological solutions that meet the requirements and features of the technological process of MEMS fabrication and that are optimized in terms of energy consumption, dimensions, consumption of reagents etc.

Keywords: reactor; individual processing; technochemistry; microelectromechanical systems (MEMS); microassembly; efficiency.



ВВЕДЕНИЕ

Объединение полупроводниковых приборов и механических элементов в составе МЭМС делает возможным получение комплексного решения широкого круга задач на одном кремниевом чипе. Это связано с появлением дополнительных возможностей по восприятию параметров окружающей среды с помощью интегрированных микросенсоров и формированию управляющего воздействия с помощью микроактюаторов. Микроактюатор является важнейшей составляющей большинства МЭМС, поскольку он содержит микромеханизм, преобразующий управляющий сигнал в движение. Известно значительное количество актюаторов (электростатические, магнитные, пьезоэлектрические, гидравлические, тепловые и т. д.), а номенклатура микроэлектромеханических систем, соответственно, еще более обширна и представлена акселерометрами, гироскопами, микрофонами, микрозеркалами, микродвигателями и т. п. При этом для отработки функционирования опытных образцов активно практикуется изготовление малых экспериментальных серий, изготовленных на одной пластине [1, 2].

Технологии создания микроэлектромеханических систем непрерывно развиваются. Это связано с большой привлекательностью МЭМС-устройств, обусловленной их небольшими размерами, надежностью, малым потреблением энергии и небольшой стоимостью, что позволяет использовать их в медицине, промышленной электронике, нефтегазовой отрасли, автомобилестроении и многих других областях.

При изготовлении МЭМС требования к размеру кристалла и диаметру пластины оказываются менее жесткими в сравнении со стандартными изделиями микроэлектроники, а минимальный размер элемента МЭМС лежит в диапазоне 2–0,18 мкм, что позволяет использовать для их производства оборудование, характеристики которого удовлетворяют широкому кругу задач, многие из которых по формальным признакам могли быть признаны даже устаревшими. Поэтому в производстве МЭМС используются пластины диаметром 100–200 мм [3]. Однако производство МЭМС требует поиска новых конструкторско-технологических решений, а также разработки и создания нового оборудования

с целью улучшения функциональных параметров изделий и развития направления в целом.

ТЕХНОЛОГИИ МЭМС

Технология производства МЭМС базируется на технологии изготовления интегральных схем (ИС), использует ее методы, принципы и подходы, поэтому многие этапы микроэлектронного и МЭМС-производства схожи, однако необходимо отметить и отличия: в технологии МЭМС наряду с традиционными материалами используются стеклотермоупроченные и некоторые другие материалы, не применяемые в технологии ИС.

Стандартный процесс производства устройств с МЭМС состоит из трех основных этапов: осаждения, формирования рисунка и травления. На подложке, обычно кремниевой, выращиваются либо осаждаются тонкие пленки, далее следует процесс литографии, посредством которой наносится рисунок, затем — процесс травления, в ходе которого создается трехмерная структура. Этап осаждения предполагает нанесение слоев методами эпитаксии, окисления, напыления, либо химического парофазного осаждения (рис. 1). Данная последовательность может неоднократно повторяться в технологическом процессе для создания более сложных объектов. Кроме того, возможен четвертый этап — спайка двух и более пластин вместе [4, 5].

Неотъемлемой составляющей трех вышеуказанных этапов производства, а также этапа подготовки пластин к процессу являются операции жидкостной химической обработки. К ним относятся операции химической очистки и отмывки пластин, активации поверхности, химического и электрохимического осаждения, изотропного и анизотропного травления, химического удаления фоторезистивных масок. В качестве обрабатываемых материалов выступают материалы подложки (моно- и поликристаллический кремний, стекло, кварц, сапфир и т. д.), конструкционные материалы (нитриды и карбиды кремния, металлы: алюминий, титан, вольфрам, медь, золото и платина), материалы жертвенного слоя, а также материалы маскирующих слоев.

Микрообработка — это создание трехмерных структур внутри кремниевой подложки или на ее поверхности. Важную роль для микрообработки играет кристаллическое состояние кремния. Травление кремния протекает по электрохимическим законам. Основными катодными реакциями на кремнии являются выделение водорода и восстановление молекул окислителей. Анодные и катодные реакции

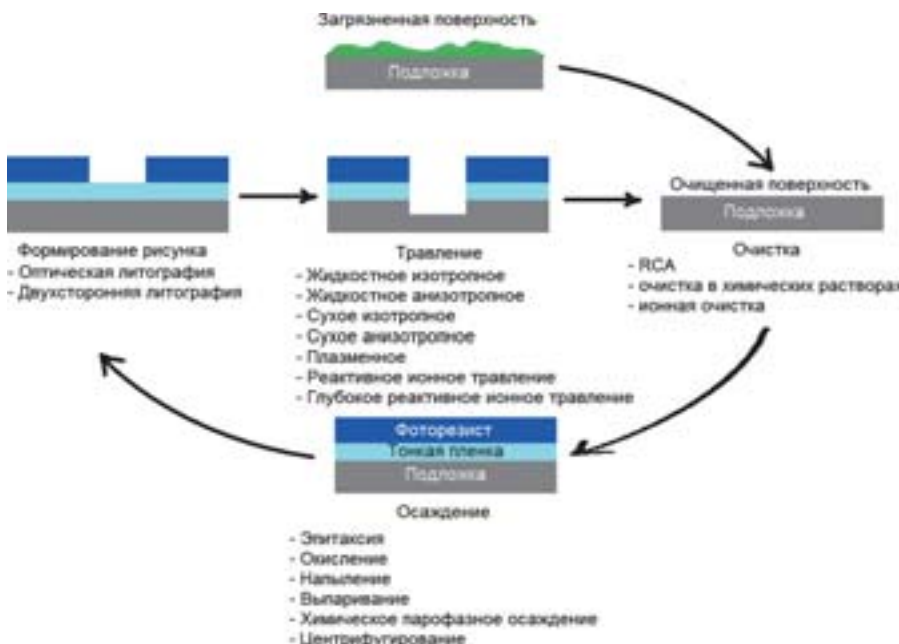


Рис. 1. Процесс изготовления МЭМС

для микрообработки играет кристаллическое состояние кремния. Травление кремния протекает по электрохимическим законам. Основными катодными реакциями на кремнии являются выделение водорода и восстановление молекул окислителей. Анодные и катодные реакции

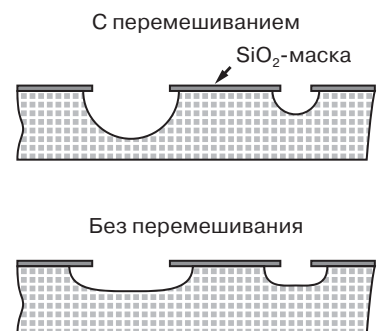
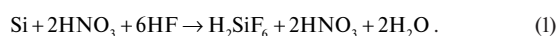


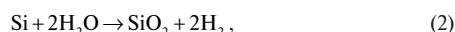
Рис. 2. Профили, получаемые методом изотропного травления с перемешиванием раствора и без перемешивания

идут одновременно на микроанодах и микрокатодах, пространственно разделенных на поверхности кремния. Выбор травителя позволяет производить изотропное либо анизотропное травление кремния. Изотропным травление является в том случае, когда его скорость не зависит от кристаллографической ориентации подложки, т. е. травление во всех направлениях протекает с одинаковой скоростью. Процесс изотропного травления в смеси плавиковой и азотной кислот состоит из двух стадий: окисления кремния и последующего травления оксида, и суммарно может быть представлен уравнением [6].



В этом растворе азотная кислота выступает в роли окислителя (разрывает ковалентные связи в полупроводнике), а плавиковая кислота используется в качестве растворяющей среды (растворяет продукты окисления). Растворимость продуктов окисления можно повысить добавлением уксусной кислоты, выступающей в качестве комплексообразователя. В качестве факторов, влияющих на скорость травления и получаемый профиль, можно обозначить состав травителя, температуру, перемешивание раствора, скорость отвода продуктов реакции и подвода реагентов к поверхности полупроводника, испарение травителя, приводящее к изменению его концентрации, а также дефектность пластины (рис. 2). Большинство этих факторов плохо поддается контролю. Это приводит к тому, что невоспроизводимость скорости травления вносит основной вклад в невоспроизводимость геометрии упругого элемента.

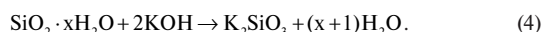
Особенностью анизотропного травления является разная скорость удаления атомных слоев в различных кристаллографических направлениях. Данное явление объясняется разной плотностью упаковки атомов в разных плоскостях, а также характером связи поверхностных атомов между собой и с атомами, расположенными в объеме кристаллической структуры полупроводника [4]. Самым распространенным анизотропным травителем является водный раствор гидроксида калия, а процесс травления происходит в три стадии. Первая стадия — окислительно-восстановительная:



далее происходит гидратация полученного оксида:



на третьей стадии гидратированный оксид растворяется:



Также в качестве травителей используют многокомпонентные растворы гидроксида тетраметиламмония, гидразина, этилендиамина [7].

Важным аспектом технологии создания МЭМС является использование жертвенных слоев. Они представляют собой тонкие пленки, наносимые на структурные слои, и необходимы при формировании пустот и подвижных деталей в трехмерной структуре (рис. 3). Для травления жертвенного слоя пригодны как традиционные растворы на основе плавиковой кислоты, так и перекисно-аммиачные растворы, обладающие большей селективностью к травлению SiO_2 по сравнению с кислотными травителями, но значительно уступающие последним в скорости травления [4].

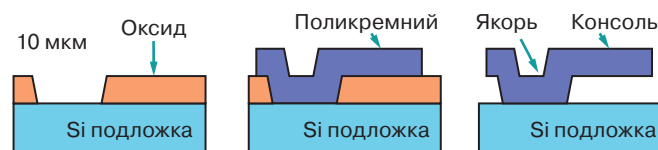


Рис. 3. Процесс создания подвижных частей МЭМС с использованием жертвенных слоев

В качестве материала жертвенного слоя наибольшее распространение получили диоксид кремния, который получают термическим окислением или пиролитическим осаждением из газовой фазы, алюминий, поликремний, осаждаемый из газовой фазы при пониженном давлении, а также полимеры. Преимуществом полиимида является возможность формирования тонких слоев, а также высокая адгезия и селективность травления. Использование фоторезистов позволяет снизить температуру и время проведения процессов формирования и удаления жертвенного слоя.

Для создания маскирующих покрытий при различных видах микропрофилирования часто используются слои оксида кремния (SiO_2) и нитрида кремния (Si_3N_4), фоторезист, реже — пленки некоторых металлов (Al, Ag, Au, Cr и др.). Технология нанесения и обработки слоя Si_3N_4 осуществляется на типовом оборудовании. Кроме того, слой Si_3N_4 отличается высокой стойкостью к известным травителям кремния (подтравливания Si_3N_4 практически не наблюдается). Однако после создания рельефа на кремниевой пластине и осаждения слоя Si_3N_4 на изломах может наблюдаться растрескивание защитного покрытия. В таких случаях в качестве защитного покрытия используется слой SiO_2 . Стоп-слоем при жидкостном анизотропном травлении монокристаллического кремния могут служить слои и области с высокой концентрацией бора. При концентрации бора $7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ кремний характеризуется p -типом проводимости и имеет скорость травления в КОН практически равную нулю [7].

Таким образом, процессы жидкостной химической обработки при изготовлении МЭМС весьма разнообразны и чувствительны к условиям их реализации.

Традиционным подходом к жидкостной химической обработке пластин является метод групповой обработки. Данный метод предполагает загрузку пластин в кассете в технологическую ванну и выдерживание в рабочем растворе в течение определенного времени. Далее кассета переносится в стоп-ванну для удаления рабочего раствора, оставшегося на пластинах, и, наконец, помещается в каскадную промывку. Такой метод имеет высокую производительность, а технология налажена и не вызывает затруднений. Однако близкое расположение пластин в кассете может приводить к неравномерности обработки, а повторное применение рабочего раствора вызывает его обеднение, при этом пластины могут загрязняться продуктами реакций. Необходимо отметить, что для групповой обработки характерны большие объемы ванн, в которых затруднительно точно поддерживать такие параметры растворов, как температура, концентрация и др.

В свете вышесказанного логичным и технологически более выгодным для производства МЭМС представляется переход к индивидуальной обработке пластины. При этом обработка каждой пластины производится небольшой свежей порцией раствора, что позволяет избежать взаимного влияния пластин друг на друга, снижает количество привносимых загрязнений, уменьшает расход реактивов и увеличивает выход годной продукции. Поскольку при производстве МЭМС используются токсичные вещества, применение индивидуальной химической обработки



снижает риск для здоровья человека. Установка индивидуальной обработки может быть востребована университетами и научно-производственными предприятиями, занимающимися разработкой и созданием новых МЭМС.

Существующее оборудование индивидуальной обработки можно условно разделить на три класса (рис. 4). К первому будем относить установки, в которых обработка пластин осуществляется только с одной стороны, пластина располагается на высокоскоростной центрифуге, а подача реактива осуществляется методом полива. Второй класс в этой условной классификации включает в себя оборудование для двухсторонней обработки пластин, которые закреплены с помощью специальных держателей и обрабатываются погружным способом в ваннах малого объема. Погружение пластины может производиться как вертикально, так и горизонтально. Наконец, третий способ обработки пластин — обработка спреем. Среди производителей оборудования первого типа можно обозначить фирмы Veeco, США (установка WaferStorm), INNO-MAX Co. Ltd., Южная Корея (серия Astro), Jaesung Engineering Co., Южная Корея (Spin Etchers LSE-200, LSE-300). WaferStorm предназначена для операций удаления резиста, обратной литографии для формирования металлизированного слоя (Metal Lift-Off), удаления флюса. В качестве особенности данной установки производители отмечают предварительное выдерживание пластины в камере с распыленной жидкостью (спрей). Далее пластину переносят на жидкостную обработку. Обработка горизонтально расположенных пластин осуществляется методом полива. Эта уникальная последовательность операций приводит к улучшению смачиваемости пластины и снижает суммарное время обработки. Фирма INNO-MAX (Южная Корея) производит оборудование серии ASTRO для проведения на пластинах диаметром 200 и 300 мм процессов отмывки, травления металлов, удаления фоторезиста. В данном оборудовании на горизонтально расположенную

пластину подается рабочий раствор, обработка происходит в луже. На мировом рынке представлено оборудование корейской фирмы Jaesung Engineering Co., предназначенное для снятия резиста и травления оксидной пленки. Данное оборудование изготовлено из химически стойких материалов, оснащено распылителем и датчиками контроля температуры реактивов и потоков химикатов.

Компания S. P.M. s.r.l. (Италия) изготавливает оборудование для обработки индивидуальных пластин как методом полива (Metal Lift-Off equipment), так и методом вертикального погружения. В таком случае пластина обрабатывается с двух сторон. Таким образом, мы перешли ко второму классу оборудования в условной классификации, который включает в себя оборудование, позволяющее осуществлять двухстороннюю обработку пластин, которые закреплены с помощью специальных держателей и обрабатываются погружным способом в ваннах малого объема. Вертикальное погружение пластины предусмотрено также на установке Electrochemical Deposition System STRATUS (TEL-NEXX, Япония). Пластина помещается в специальную оснастку, закрепляется и опускается в ванну.

Переходя к горизонтальному погружению пластины в ванну, стоит выделить оборудование Applied Materials, разработанное на основе оборудования Semitool, а также оборудование ClassOne. В данном оборудовании пластина закрепляется в оснастке, затем переворачивается и при вращении под углом входит в ванну, в которой циркулирует раствор: подача производится снизу, затем жидкость переливается через край ванны. После смачивания поверхности всей пластины крышка прижимается к ванне и запускается целевой процесс (рис. 5). Установка типа Solstice LT применяется для разработки и экспериментальных производств, а установка типа Solstice S8 с полной автоматизацией переноса пластин из кассеты в кассету и с сенсорным экраном, интерфейсом GEM / SECSII применяется для массового производства. Ранее оборудование такого типа изготавливалось фирмой Semitool (LT-210C, Raider ECD Au).

РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты. Разрабатываемое нами технологическое оборудование предназначено для проведения операций травления, промывки, сушки, мегазвучковой очистки в различных растворах с возможностью варьировать угол наклона ячейки для оптимизации технологического процесса. Реактор представляет собой универсальную конструктивную единицу — модуль (рис. 6). Данный модуль может функционировать как индивидуально, так и, при переходе к высокопроизводительному оборудованию с полной автоматизацией технологических и транспортных процессов, в составе кластера. Кластер составляют из трех, шести или восьми технологических модулей, модуля

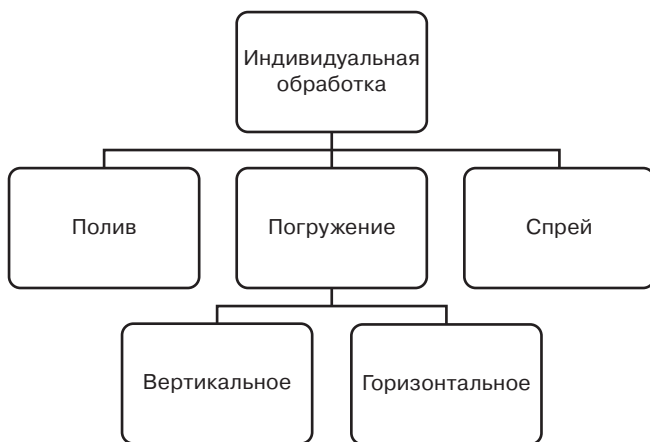


Рис. 4. Классификация методов индивидуальной обработки



Рис. 5. Оборудование ClassOne Solstice

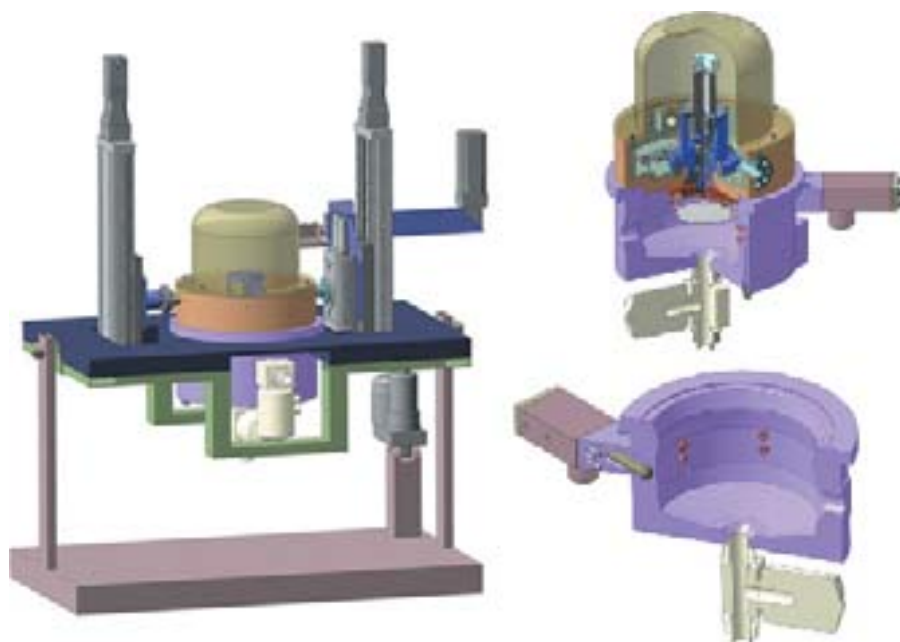


Рис. 6. Разрабатываемый технологический модуль для индивидуальной обработки пластин и подложек и рабочая камера

загрузки-выгрузки пластин, а объединение достигается за счет единой роботизированной транспортной системы.

Рабочая камера изготавливается из химически стойких материалов. Во время процесса реактор герметично закрывается, что обеспечивает изоляцию зеркала и паров химически агрессивных жидкостей, применяемых при обработке, как от оператора, так и от внутреннего пространства установки. Оборудование предназначено для проведения заданной последовательности теххимических и физических операций: травления поверхностей подложки в химических реактивах, промывки поверхностей подложки в деионизованной воде, мезазвуковой очистки в жидких средах; центробежной и тепловой сушки, а также контроля качества очистки. В процессе очистки подложка в теххимической ячейке вращается с заданными угловыми скоростями и ускорениями в заданном направлении, скорость

вращения может варьироваться от нескольких оборотов в минуту до нескольких тысяч оборотов в минуту в зависимости от поставленной задачи. Рабочая камера может быть последовательно заполнена несколькими разными растворами, что на практике реализуется при помощи отдельных каналов. Жидкости, газы и энергетические потоки подаются и удаляются в/из объем(а) через специальные каналы и форсунки. Функциональные возможности реактора предполагают смену обрабатываемых химических реактивов один за другим через соответствующие циклы промывки и нейтрализации (при необходимости). Конструкция реактора предполагает возможность реализации различных способов подачи реактивов в объем реактора: равномерная подача из одной или нескольких форсунок реактивов под разным давлением (соответственно, с различной скоростью), подача спреем, душирование.

Для закрепления пластин и подложек круглой формы различного диаметра и толщины, квадратной и прямоугольной форм различного размера предусмотрен специальный держатель. Несколько типов держателей (для химической и электрохимической обработки) обеспечивают двухстороннюю обработку пластины/подложки.

Сушка пластин осуществляется за счет подачи потока осушенного, нагретого азота под углом к пластине. Пластина при этом вращается. Сухой воздух, циркулируя в камере, насыщается парами воды, после чего уходит через специальный канал в боковой стенке камеры.

Система управления реактором и подачи химических реактивов предусматривает программное задание и контроль процесса обработки, включая температуру, дозу, pH, обороты, количество циклов.

При переходе к высокопроизводительному оборудованию с полной автоматизацией технологических и транспортных

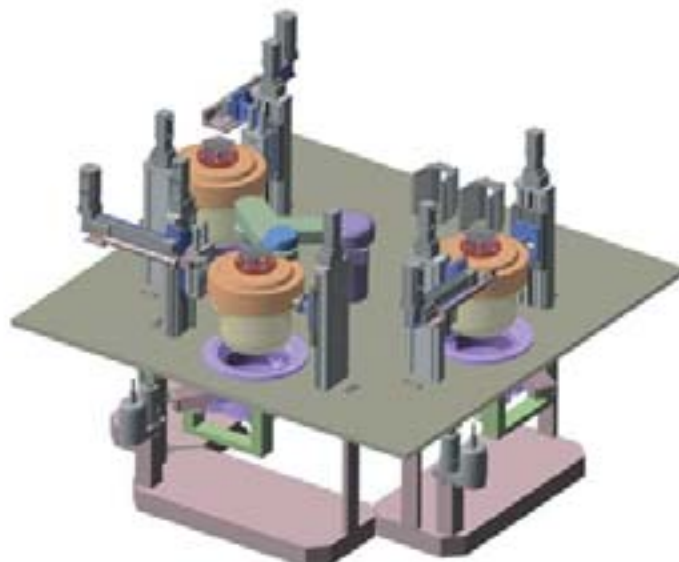
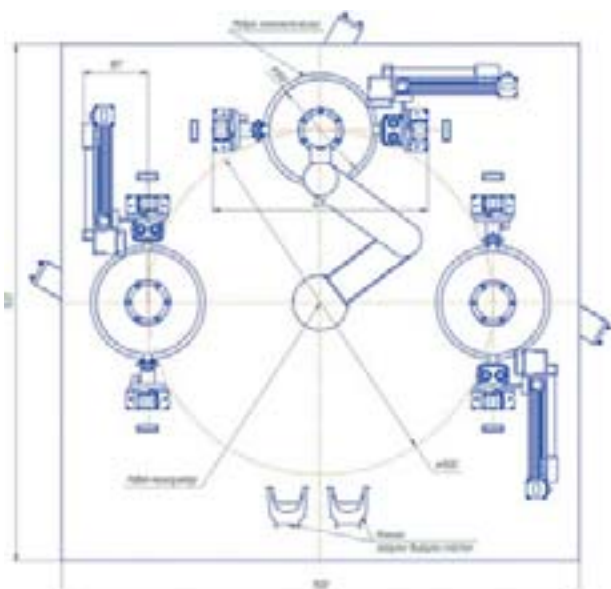


Рис. 7. Чертеж и схематическое изображение радиально скомпонованного кластера теххимической обработки пластин

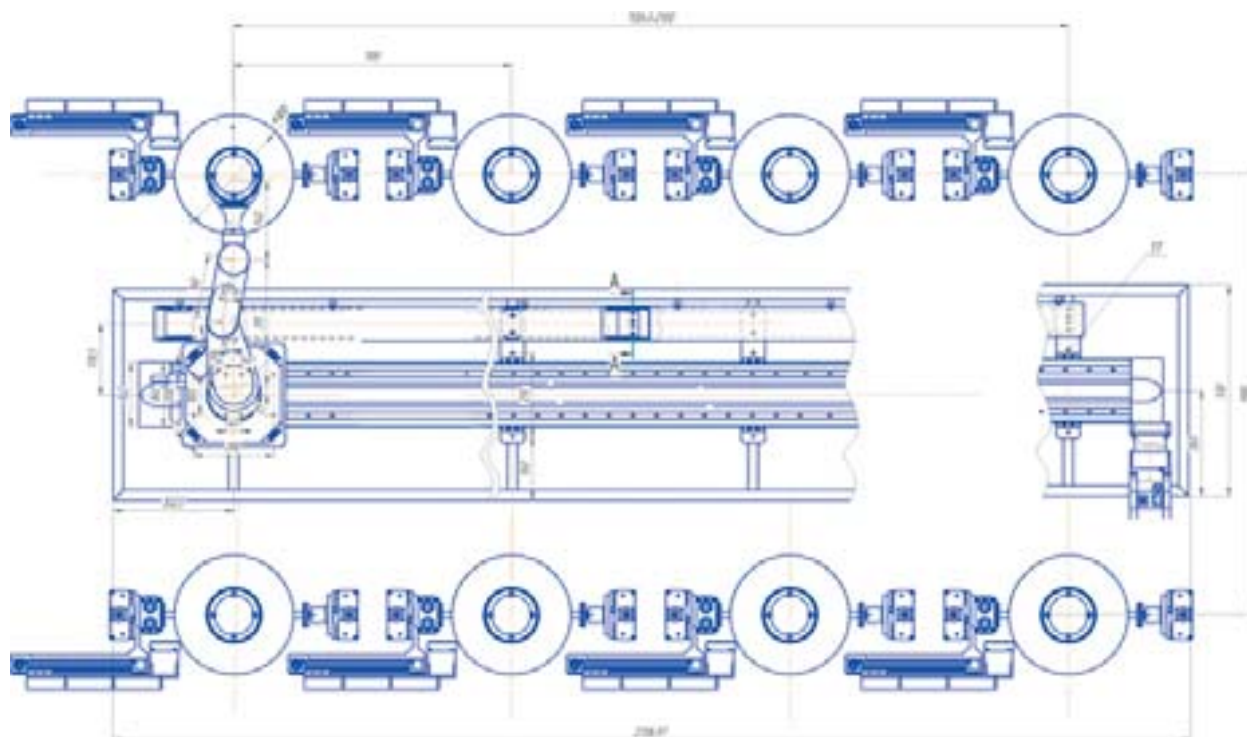


Рис. 8. Чертеж кластера линейной конфигурации для теххимической обработки пластин

процессов возможно построение автоматического теххимического кластера, состоящего из определенного количества таких модулей, модуля загрузки-выгрузки кассет, объединенных единой роботизированной транспортной системой. Радиальная компоновка кластера с центральным роботом-манипулятором (рис. 7) объединяет три теххимических модуля на одной платформе. Это приводит к значительному ускорению процесса обработки пластины, при этом кластер имеет сравнительно небольшие габариты. Линейная компоновка кластера (рис. 8) позволяет располагать на одной платформе сколь угодно много теххимических модулей, что приводит к значительному увеличению количества выполняемых обработок и процессов.

Таким образом, разработка российского оборудования на кластерной платформе для осуществления основных технологических операций при изготовлении МЭМС и микроборок является актуальной и стратегической задачей, требующей новых конструкторских и технологических решений, отвечающих требованиям и особенностям технологического процесса изготовления МЭМС и оптимизированных с точки зрения энергопотребления, габаритов, расхода реактивов и т. п. Хотелось бы подчеркнуть, что успешное решение задачи создания полного комплекса кластерного оборудования для оснащения мини-фабрик для изготовления МЭМС возможно при объединении российских предприятий — разработчиков специального технологического оборудования и разработчиков устройств МЭМС и определения единой концепции такого комплекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы нами рассмотрены теххимические операции, являющиеся частью процесса изготовления МЭМС. Основная сложность процесса, по сравнению с производством интегральных схем, заключается в создании трехмерных подвижных элементов микромеханических систем. Обработка индивидуальных пластин, по-видимому, позволяет уменьшить количество

брака за счет исключения взаимного влияния пластин друг на друга во время обработки, а также вследствие постоянного обновления рабочего раствора.

Наличие мировой тенденции к индивидуальной обработке пластин показано в продукции компаний Veeco, INNO-MAX Co. Ltd., S.P.M.s.r.l., ClassOne и др., причем конструктивные решения процесса обработки могут быть самыми разнообразными: полив, погружение, спрей.

Разрабатываемое нами оборудование индивидуальной химической обработки объединяет операции очистки, обработки мезазвуком и травления в одном реакторе, причем условия процесса и операции, входящие в процесс, могут изменяться в зависимости от необходимости достаточно широко.

ЛИТЕРАТУРА

1. Одинец А. И., Федорова Л. Д., Федоров Д. В. Применение микроэлектромеханических систем в медицине // Евразийское научное объединение. — 2017. — Т. 1, № 4 (26). — С. 65–68.
2. Одинец А. И., Федорова Л. Д., Федоров Д. В. Микроэлектромеханические системы в электроэнергетике // Динамика систем, механизмов и машин. — 2016. — Т. 3, № 1. — С. 126–131.
3. Резнев А. А., Вернер В. Д. Тенденции развития МЭМС // М.: ООО «Амиант». — 2010. — 275 с.
4. <https://www.memsnet.org>, дата обращения 01.09.2017.
5. Дэн Е. Энджилеску, Кристофер Харрисон, Роналд ван Хол и др. Миниатюрный мир больших надежд // Нефтегазовое обозрение. — 2007. — С. 70–80.
6. Тимошенков С., Бойко А., Симонов Б. Чувствительные элементы МЭМС: технология определяет параметры // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. — 2008. — № 1. — С. 80–82.
7. Сергейченко А. В., Шевченко А. А. Материаловедение и технология тонкопленочных структур: лабораторные работы для студентов специальности 1-55 01 02 «Интегральные сенсорные системы» // Минск: БНТУ. — 2009. — 80 с.