

УДК 621.3.049.77+621.38+539.2

ТЕХНОЛОГИИ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ (часть II)

Д.т.н. И. Ш. Невлюдов, к.т.н. В. А. Палагин, Е. А. Чалая, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

В статье рассмотрены технологические процессы обработки материалов микросистемной техники, в частности анизотропное травление кремния, наноимпринтинг, наноимпринтговая литография, самосборка.

У статті розглянуто технологічні процеси обробки матеріалів микросистемної техніки, зокрема анизотропне травлення кремнію, наноімпринтинг, наноімпринтгова літографія, само складання.

The article describes the processes materials processing microsystem technology, in particular anisotropic etching, nanoimprint, nanoimprint lithography, self-assembly.

Ключевые слова: технологии МСТ, нанотехнологии, обработка кремния, объемные и поверхностные технологии.

Введение

В наше время уже определился ряд типовых технологических методов изготовления микросистемной техники (МСТ), которые используют достижения различных отраслей фундаментальной науки. Среди этих методов, в первую очередь, необходимо отметить распространение традиционной полупроводниковой КМОП-технологии на изготовление микромеханических устройств на кристаллах кремния с использованием подложки одновременно в качестве как конструкционного материала для механических деталей и сборочных единиц так и материала для электронных схем [1]. Но если в обычной полупроводниковой технологии структура материала меняется только в поверхностном слое, то для МЭМС необходимые трехмерные (3D) структуры, которые вызывают необходимость совершенствования стандартных процессов. Такие технологические процессы можно характеризовать как направление «вниз», [2] то есть от больших размеров к меньшим за счет улучшений исходной технологии.

Среди технологий этого направления необходимо различать технологии объемной обработки, технологии обработки и смешанные технологии, которые используют операции двух первых технологий, обеспечивающих получение высокого аспектного отношения.

Специальные МЭМС-технологии

Травление продолжает оставаться самым удобным и универсальным методом обработки кремния. Существуют многочисленные химические травители для изотропного и анизотропного, селективного травления, что определяет выбор того или иного маскирующего материала, а также другие методы травления плазменного, реактивного, ионно-лучевого, лазерно-инициированного. Особый интерес представляют, благодаря универсальности, три травильных состава: этилендиамин, пирокатехин (ЭДП) и вода; KOH и вода; HF, HNO₃ и уксусная кислота CH₃COOH.

Анизотропия травления кремния заключается в том, что поверхности (111) травятся гораздо медленнее, чем другие кристаллографические плоскости (отношение скоростей травления достигают 10³).

Анизотропные травители, такие как ЭДП и KOH, при сильном легировании образцов бором (~ 10²⁰ см⁻³) теряют скорость травления практически до нуля. Похоже, что при замещении в решетках атома кремния меньше радиусом атомом бора создается локальное напряжение растяжения. При высоких концентрациях бора (выше 5·10¹⁹ см⁻³) силы растяжения становятся настолько большими, что из-за высокой прочности связей B-Si энергия, которая необходима для удаления атомов кремния с решетки, становится очень высокой и травление полностью прекращается.

Анизотропное травление требует учета ориентации осей кристалла и часто используется при изготовлении МЭМС-структур.

Анизотропное травление кремния (100) с получением углублений в виде пирамид может использоваться для получения режущего микроинструмента (таких как скрайбер, долото) или матриц инструментов с остриями четкой геометрической формы диаметром до 50 нм путем электроосаждения толстых слоев сплавов никель-фосфор или никель-бор, которые по твердости сравнимы с инструментальными сталями.

Различные варианты анизотропного травления используются для получения сопел принтеров для струйной печати, многопереходных солнечных элементов с V-образными канавками.

Наиболее распространенными методами сухого объемного травления кремния является плазменное и реактивно-ионное травление [3, 4], проводимые в реакционных камерах низкого давления, где для запуска химических реакций требуется подвод внешней энергии.

В качестве травильных реагентов могут применяться газообразные хлорфторуглероды, гексафторид серы, бромосодержащие смеси и кислород.

Анизотропное сухое травление широко применяется, поскольку дает возможность формирования сложных геометрических структур, часто при меньшем химическом загрязнении окружающей среды по сравнению с жидкостным травлением. С помощью анизотропного сухого травления возможно изготовление глубоких, произвольно ориентированных кремниевых структур. Самые глубокие кремниевые микроструктуры выходят во время RIE.

В большинстве случаев жидкостное травление выполняется с обратной стороны подложки, в то время как плазменная - с переднего. Вертикальная объемная микрообработка кремния, получившая название SCREAM (травление монокристаллического кремния с металлизацией), представляет собой комбинацию анизотропного и изотропного плазменного травления.

Так же технологии анизотропного травления МКК позволяют изготавливать прецизионные приборы для волоконно-оптических систем связи типа: волоконно-фотодетектор, волоконно-световедущая поверхность, полупроводниковый лазер-оптоволокно, лазер-линза-волокно и многие другие. Так, в длинные V-образные канавки, полученные на поверхности пластины кремния с ориентацией (100), легко с высокой точностью (не хуже 1 мкм) включают оптические волокна малого диаметра для их присоединения к кремниевым кристаллам или с каким-либо поверхностным элементом. Оптоволоконные матрицы могут быть интегрированы с фотодиодными или лазерными матрицами, созданными на кремниевой пластине.

Глубина погружения оптоволокна в кремний может быть точно установлена созданием соответствующего стоп-слоя.

На рис. 1. представлено устройство, в котором световое излучение перпендикулярной матрицы GaAs-лазеров, собранные на поверхности кремниевой пластины, вводится в оптическое волокно, установленное параллельно матрицы с помощью V-образной канавки. Это первое волокно служит цилиндрической линзой, которая фокусирует лазерное излучение с высоким разрешением, направляя его в перпендикулярную матрицу волокон, соответствующую лазерной матрицы.

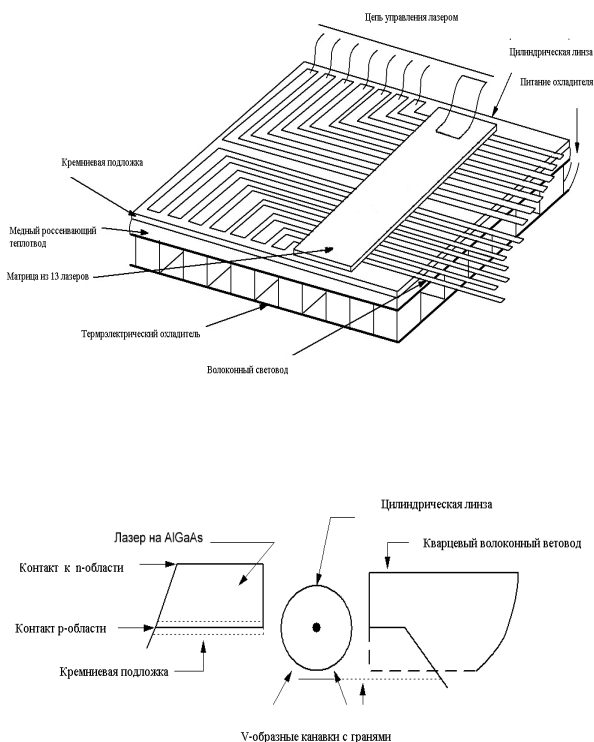


Рис.1. Узел передачи лазерного излучения в систему

Линейный пучок волокон можно свободно перемещать, сгибать, размещать независимо от корпуса лазерной матрицы. Такая конструкция обеспечивает высокую эффективность передачи лазерного излучения в оптическое волокно, а кремниевая пластина имеет особое значение, так как она эффективно отводит тепло от лазерной матрицы, позволяет размещать электрические

контакты на том же кристалле для управления индивидуальными лазерами матрицы.

V-образные канавки могут и сами использоваться как световодные структуры при их пассивации SiO₂ и заполнении полимерами.

Кроме поверхностных профильных канавок анизотропное травление кремния подходит для травления сквозных отверстий с обеспечением высокой точности их координат и геометрии отверстий.

Одними из самых простых, удобных и распространенных являются устройства струйной печати: термоэлектрические и пьезоэлектрические. Изготовление тонких мембран на кремнии используется для ПЗС-матриц, которые имеют исключительно высокую прочность, долговечность и устойчивость к вибрациям и термоциклированию; термочувствительных структур; структур чувствительных к механическим колебаниям с добротностью более 20000 (в вакууме); мембранных сенсоров давления медицинского назначения; для регулирования пневматических и гидравлических процессов; диагностики транспортных средств.

С оптической точки зрения кремний имеет преимущества над обычными стеклянными и кварцевыми зеркалами, которые применяются в высокочастотных сканирующих устройствах, за счет большего (почти втрое) соотношения E/p чем у кварца.

В МСТ, в частности в МЭМС, многие микромеханические элементы (и «узлы») имеют подвижные части. Естественно, изготавливать их, в большинстве случаев, необходимо не прибегая к сборочным операциям. Получение сложных объемных деталей и устройств из пластмасс возможно для изготовления опытных образцов с использованием методов прототипирования, микростереолитографии (в том числе – двухфотонной) [1].

Для серийного производства полезными будут неразъемные гибко-жесткие конструкции с сосредоточенной или распределенной упругостью, в том числе с изменяемой конфигурацией (формой), которые получают групповыми субтрактивными, аддитивными или комбинированными технологиями.

Подобные технологии используются при изготовлении акселерометров с емкостными датчиками, гироскопов.

Рассмотрим технологию изготовления гироскопа с вибрирующим кольцом на монокремниевой подложке (МК). Так как МК имеет анизотропные свойства, в МК подложке вытравливаются глубокие канавки, затем заполняются поликремнием, обладающим изотропными механическими свойствами. Центральная ось удерживает вибрирующее кольцо, вокруг него по окружности размещены электроды возбуждения, управления и измерения.

Технология позволяет реализовать на единой кремниевой подложке одновременно поли- и монокремниевые структуры размерами от десятков до сотен микрон электрически изолированные друг от друга.

Высокоаспектные поликремниевые структуры создаются травлением глубоких узких траншей в монокремнии, с последовательным нанесением методом

химического испарения при низком давлении (LPCVD – Low-pressure chemical vapor deposition) слоев двуокиси кремния (жертвенный слой), нитрида кремния (изоляция) и поликремния [2, 9].

Этой технологией (рис.2, рис.3) могут быть реализованы различные воздушные, емкостные промежутки, от субмикронных до десятков микрометров.

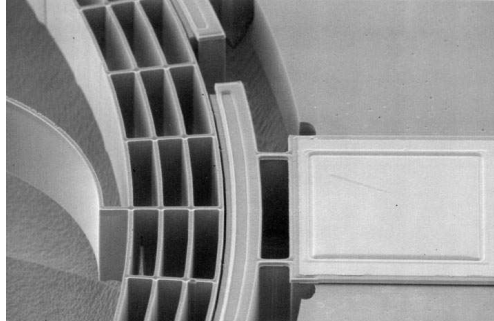


Рис. 2. Узкий и высокий (по вертикали) чувствительный кремниевый электрод, отделенный от толстого (80 мкм) поликремниевого кольцевого резонатора воздушным промежутком 1,2 мкм

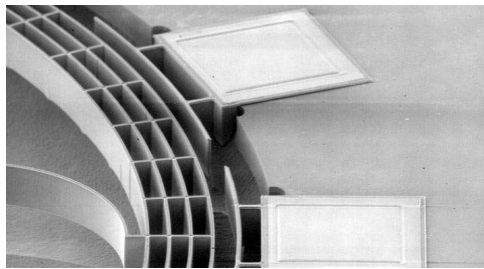


Рис. 3. Узкий и высокий поликремниевые возбуждающий и управляющий электроды, отделенные от толстого (80 мкм) поликремниевого резонатора широкими (10-20 мкм) воздушными промежутками

Их величина определяется величиной жертвенного слоя между моно- и поликремнием. Полностью кремниевая технология обеспечивает долгосрочную стабильность и температурную нечувствительность при изготовлении вертикальных электродов большой площади. Субмикронные промежутки между электродами повышают чувствительность МЭМС на порядки.

На рис. 3 показанный электрод из монокремния, отделенный от кремниевой структуры емкостным зазором и прикрепленный изоляционным слоем нитрида кремния к подложке. Такие монокристаллические, монокремниевые электроды равны по длине поликремниевым структурам и защищены по бокам глубокими наполненными траншеями и отделенными от подложки операцией сухого травления SF_6 , которая вся целиком выполняется методом глубокого реактивного ионного травления (DRJE).

Плоские электроды (рис.3.), которые разделяются более широкими воздушными зазорами, также выполнены вне поликремния.

Эта технология, также, позволяет одновременно получать электрически изолированные двухразмерные

(планарные) (2-D) и трехразмерные (3-D) (вертикальные) поликремниевые структуры на одной и той же подложке.

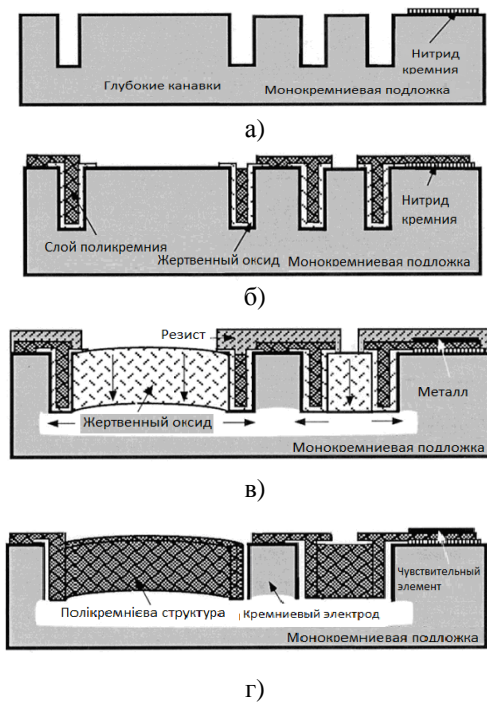


Рис. 4. Последовательность операций технологического процесса

- нанесение и получение изоляционного слоя нитрида кремния; сухое глубокое травление канавок к главному телу структуры.
- нанесение LPCVD жертвенного слоя оксида и легирование поверхности оксида; заполнение канавок LPCVD полекремнием; травление поликремния на поверхности; формирование рисунка двуокиси; нанесение легирования и рисунка поликремния;
- нанесение Cr / Au и получение рисунка; SF_6 анизотропное травление и подрезание кремниевых структур / электродов (толстый резист используется как маска);
- пленочный резист; травление жертвенного слоя оксида до полного освобождения структуры.

Последовательность операций шести-масочного технологического процесса приведена на рис. 4. Перечислим основные операции процесса:

- Нанесение на поверхность кремниевой подложки слоя нитрида кремния, и получение площадок изоляции под электроды планируемой структуры проводников.
- ГРИТ - глубокое реактивно-ионное травление траншей будущей структуры в низкорезистивной кремниевой подложке (50 ... 100 мкм, $90^\circ \pm 1$) (Фоторезист AZ 4400), 4 мкм.
- Нанесение (LPCVD) жертвенного слоя SiO_2 на поверхность и внутренние поверхности траншей и его легирование расчетной дозой бора.
- Нанесение защитного покрытия.
- Нанесение (LPCVD) поликремния.
- Травление соединительных частей поликремния (на поверхности).
- Формирование рисунка двуокиси кремния.
- Защита и формирование рисунка поликремния.

9. Нанесение и получение рисунка проводника Cr/Au.

10. ГРИТ (SiF_6) - глубокое вертикальное травление и подрезание дна для высвобождения структуры электродов (как маска используется толстый слой резиста).

11. Нанесение пленочного резиста, травление жертвенного SiO_2 для полного освобождения структуры, с целью получения необходимого качества стенок траншей.

LPCVD двуокиси кремния происходит при достаточно высокой температуре (920°C) путем взаимодействия дихлорсилана (SiH_2Cl_2) и окиси азота (N_2O).

LPCVD поликремния происходит при температуре 588°C . Для уменьшения электрического сопротивления поликремний легируется бором, который в этом случае имеет значительные преимущества над фосфор-легируемым поликремнием при достаточно долгом взаимодействии с HF.

Применялся новый метод легирования поликремния, в котором легирование расчетной дозой бора сначала применялось к жертвенному слою SiO_2 .

После заполнения траншей поликремнием, легирующий бор при нагревании до 1050°C в течение двух часов за счет диффузии обеспечивал необходимый уровень легирования поликремния.

Глубокое реактивно-ионное травление (двухступенчатое: вертикальное и изотропное) происходит последовательно как в поверхностной технологии травления кремния так и в индуктивно связанной плазменной системе.

Нанотехнологии

Для получения рисунка слоев схем в нанотехнологиях известно небольшое число методов: перьевая литография, литография наносферами, наноимпринтинг, 3D голографическая литография и литографически индуцированная самосборка [4, 5, 6].

С наноимпринтингом связывают возможность получения интегральных наносхем, а так же развитие научных направлений в биологии, химии и материаловедении.

Наноимпринтинг или NIL-наноимпринтиговая литография является дешевой, обеспечивающей высокий выход годных и высокопроизводительной технологией получения рисунка схем с разрешающей способностью менее 10 нм на подложках с размерами сторон приблизительно 10 см (даже 20 см).

Разработками материалов, технологических процессов и технологического оборудования для наноимпринтинга занимаются многие фирмы и университеты в разных странах мира.

Технология NIL имеет несколько разновидностей [2,8]:

1. Горячее тиснение, прессование, Hot embossing, T-NIL-Thermal nanoimprinting lithography –термическая наноимпринтиговая литография.

2. УФ-стимуляция - UV curing, фотостимулированная литография (P-NIL - photocuring NIL).

3. Обратный наноимпринтинг - Reversal imprinting.

4. Наноконтактная печать - Nancontact printing.

5. Микроконтактная печать μ contact printing (μ CP).

Технологический процесс наноимпринтинга горячим прессованием (рис. 5) требует нагрева фоторезиста выше температуры его полимеризации. Штамп-матрица деформирует слой фоторезиста, оставляя на нем рельеф рисунка матрицы.

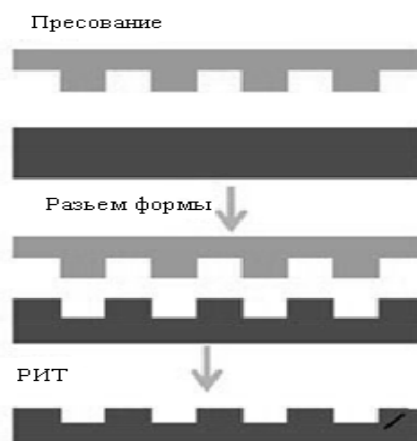


Рис. 5. Термический наноимпринтинг

В процессе T-NIL, как правило, используется один слой фоторезиста (PMMA, SU-8NX), а давление прикладывается дольше времени нагрева. Температурно-временной график обработки приведен на рис. 6.

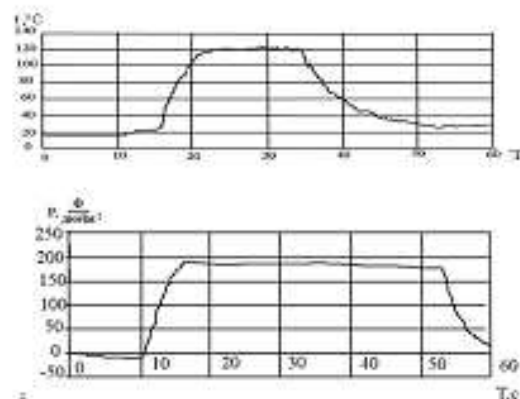


Рис. 6. Температурно-временной график
а) изменение температуры;
б) приложение давления.

Последующая операция реактивно-ионного травления (РИТ) кислородом обеспечивает удаление остатков резиста в углублениях оттиска.

Типовые режимы горячего тиснения: температура – 120°C , давление - 2,5 МПа, время 1 мин. Возможно использование метода в производстве фотонных кристаллов, наножидкостных МЭМС и др.

В P-NIL процессе используется два слоя фоторезиста. Давление штампа-матрицы и верхний слой фоторезиста прикладывается при комнатной температуре.

Экспонирование УФ излучением необходимо для взаимной связи двух мономеров. После снятия давления отпечаток рисунка матрицы образуется на верхнем слое фоточувствительного резиста. Далее следуют две ступени реактивно-ионного травления (травитель на фоторезистивной основе, затем кислородное РИТ), используемого для удаления остатков фотополимеризуемого резиста верхнего слоя и передающего рисунок нижележащему слою резиста. Отпечатки на резисте, полученные либо T-NIL, либо P-NIL, могут использоваться для подсудующих аддитивно-субтрактивных процессов.

Приведем более детальное описание P-NIL технологии (рис. 7). Подложка толщиной 0,5 мм со сторонами 10 см, изготовленная из стекла Pyrex7740, покрывается толстым слоем окисла (100 нм) усовершенствованным плазмохимическим осаждением из паровой фазы (PECVD-plasma enhanced chemical vapor deposition). Рисунок на поверхности штампа-матрицы получается литографией с высокой разрешающей способностью (электроннолучевой литографией, синхротронной литографией, NIL, интерференционной литографией и т.д.) и переносом на PECVD оксида отслоением и РИТ на фоторезистивной основе. Поверхность штампа пассивируется одним монослоем перфторалкилхлоросилана для облегчения разъема формы. Выступающая часть на штампе-матрице около 60 мм.

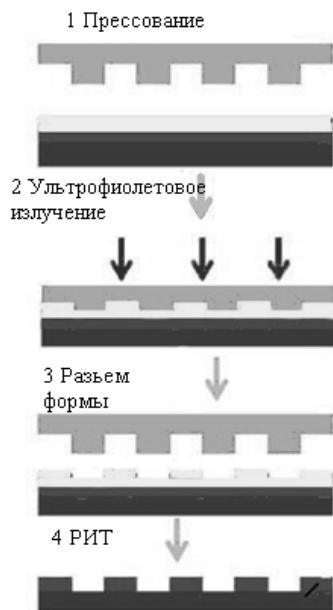


Рис. 7 Нанопринтинг фотостимулированный

Печать осуществляется на подложках 0.5x100x100 мм. Сначала подложка пропитывается $\text{NHON:H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (1:1:5) при 75°C в течение 15 мин, а затем отмывается 5 мин деонизированной водой. После сушки струей очищенного азота поверхность подложки, нагретая до 200°C, очищается струей CO_2 под высоким давлением.

И нижний слой резиста, и фоточувствительный резист, применяемые для импринтинга подложек, наносятся стандартным методом центрифугирования, который обеспечивает высокую однородность толщины

резиста (лучше 5 % на всей 100 мм подложке), малую длительность цикла и высокий выход изделий.

Резист подслоя Nanonex NXR-3010 первым наносится центрифугированием на кремниевую подложку, затем следует сушка при температуре 90°C в течение 25 мин. Необходима толщина пленки около 200 нм. Фоточувствительный резист Nanonex NXR-2010 также наносится центрифугированием с обеспечением толщины ~70 нм и остается в жидком состоянии до момента схватывания слоев.

Стекланный штамп, например из стекла Pixex 7740, давит на двухслойный резист на обрабатываемой подложке. Величина давления по всей четырехдюймовой подложке обычно 15...50 фунтов на дюйм квадратный (10...35 Н/см²). NXR-3010 резист является схватывающимся под действием УФ излучения, проходящего через стекланный шаблон - матрицу. Порог схватывания NXR-3010 резиста равен 40 мДж/см² и время экспозиции на установке NXR-2000 для нанопечати – около 5 с. После удаления штампа-матрицы рисунок на его поверхности отпечатывается в фоточувствительном резисте.

Реактивно-ионное травление, состоящее из двух ступеней, используется для окончательного переноса изображения на оба слоя резиста.

В процессе нанопринтинга используется прессование с воздушной прокладкой (air cushion press - ACP), которая обеспечивает одинаковое давление по всей поверхности подложки. Такая однородность давления недостижима в процессах, зависящих от параллельности поверхностей подложки и штампа-матрицы. В этом процессе достигается однородность давления даже при печати на криволинейных поверхностях. Увеличивается также долговечность штампа-матрицы. Не требуется сверхвысокая плоскостность подложки, как при прессовании с малыми давлениями и параллельных плоскостях.

Прессование с воздушной прокладкой разработано и запатентовано фирмой Nanonex и используется в ряде установок нанопринтинга NX-1000, NN-2000, NX-3000. Это оборудование предназначено для T- NIL и P- NIL с устройством совмещения и без него. Прессование с воздушной подушкой обеспечивает одинаковое давление на подложках с размерами сторон до 200 мм., Все операции выполняются по программе, автоматически, кроме подачи и съема плат. Разрешающая способность печати установки NX-2000 лучше 10 нм.

Поперечное сечение и вид сверху на фоторезист в процессе P- NIL приведены на рис. 8

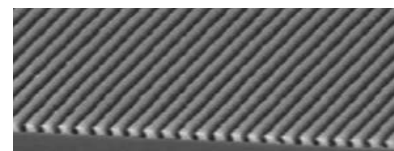


Рис. 8. Образец системы проводников полученных в процессе P- NIL

В МСТ, кроме кремния, используются и другие материалы, в том числе гибкие пленочные, пригодные для получения гибко-жестких элементов.

В многослойных контактирующих устройствах, применяемых при контроле электрических параметров многослойных печатных толсто- и тонкопленочных плат, гибкой основой является фольгированная алюминием полиимидная пленка. Методом фотолитографии на пленке вытравлена система проводников. Контактные площадки (места расположения будущих зондов) никелируются. Методом оплавления конвекцией горячего воздуха шарики припоя появляются, образуя матрицу зондов. Зонды могут изготавливаться и другими способами (оплавлением припойных паст, гальваническим осаждением и оплавлением и т.д.) [11].

Давление зондов на контактные площадки создается в подключающем устройстве сжатым воздухом после закрепления шлейфа с зондами в корпусе с уплотнением по периметру зоны размещения зондов. Создание давления через воздушную подушку обеспечивает равномерное распределение усилий прижатия по зондам.

Выводы

Учитывая выше изложенное можно сделать вывод, что микросистемная техника в мире достигла достаточно высокого уровня, а именно:

- ряд фирм разработали полные комплекты программ для автоматизированного проектирования и моделирования широкой номенклатуры МЭМС-устройств (SPICE, CoventorWare, TannerPro);

- созданы механические, оптомеханические, акустические, жидкостные элементы МЭМС, которые можно выбирать подобно элементной базе электронных устройств вместе с технологией их изготовления;

- отработаны различные виды поверхностной и объемной технологии, позволяющие получать 3D-структуры;

- отработаны технологические процессы корпусирования структур со сращиванием частей на атомно-молекулярном уровне и др.;

- освоено массовое производство ряда изделий, которые доказали высокую технико-экономическую эффективность (медицинские датчики давления, акселерометры, термо- и пьезо- струйные печатающие головки, микрозеркальные устройства);

- созданы многочисленные МЭМС-сенсоры;

- разработано специализированное технологическое оборудование для производства МЭМС;

- неимоверно быстрыми темпами МЭМС проникают в различные сферы техники, особенно в военную и микро- робототехнику;

- микроманипуляторы используются в качестве инструментов исследования микро- и наноструктур.

Направление нанотехнологий является глобальным в ряде областей использования результатов:

- кардинальное изменение материаловедения, что позволяет создавать материалы с уникальными свойствами, интеллектуальные материалы для различных областей применения (углеродные нанотрубки, графен, графан, фуллерены, сенсоры - металлические квадраты, фотонные кристаллы, магнитные жидкости, микропористые керамики и многие другие);

- действие в диапазоне наноразмеров квантовомеханических принципов: размерная, зарядная, энергетическая дискретизация, неравномерность распределения примесей в полупроводниках, туннельный эффект, волновой связь и передача, возрастание роли гетерогенных процессов, синергетическое изменение свойств наноструктур и др.

В целом дальнейшее развитие и использование технологий микросистемной техники открывает перед человечеством самые разнообразные горизонты, связанные с использованием нового поколения химических и биологических сенсоров с мономолекулярным покрытием; наноразмерных электронных компонентов, в частности, переключателей, которые позволяют увеличить память электронных носителей в миллионы раз; миниатюрных нанороботов, медицинских зондов, принципиально новых систем ввода лекарств и даже генов в живые организмы, диагностики с использованием лабораторных на кристалле, ремонта и восстановления утраченных органов, создания керамических, полимерных, металлических и других материалов, в т.ч. интеллектуальных с наноструктурами, что значительно повышает механические характеристики, укрепление полимеров наночастицами, что позволяет резко снизить вес деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Невлюдов И.Ш. Технологии микросистемной техники [Текст]/ И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е. А. Чалая/– НТЖ «Технология приборостроения», Харьков. – 2014.– № 3, С.7-10.

2. Вернер В. Д. Технология миниатюризации «сверху вниз» или «снизу вверх» [Текст]/ В. Д. Вернер, П. П. Мальцев, А. Н. Сауров, Ю. А. Чаплыгин// Нано- и микросистемная техника.- 2005. -№ 1.-С. 5-9.

3. Ефимов Н. Е. Микроэлектроника: Пректирование, виды микросхем, функциональная микроэлектроника [Текст]: уч. пособие для приборостроителей. спец. вузов/ Н. Е. Ефимов, Н. Я. Козырев, Ю. Н. Горбунов. – М.: Высшая школа, 1987.-416с

4. Черняев В. Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров [Текст]: учеб. для вузов / В. Н. Черняев . – М. : Радио и связь, 1987. – 464 с.

5. Ратнер М. Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи [Текст]/ М. Ратнер.- М. : ИД «Вильямс», 2004. – 240 с.

6. Пул Ч. Нанотехнологии [Текст]/ Ч. Пул, Ф. Оуэнс. – М.: Технонаносфера, 2007. -376 с.

7. Варадан В. Высокочастотные МЭМС и их применение [Текст]: пер. с англ./ В. Варадан, К. Виной, К. Джозе. – М. : Техносфера, 2004.– 528 с.

8. Петерсен К.Э. Кремний как механический материал/ Труды института инженеров по электронике и радиоэлектронике. 1982, т. 70, № 5, с. 5-49.

9. Невлюдов И. Ш. Нанолитография- наноимпринтинг [Текст]/ И. Ш. Невлюдов, В. А.Палагин, О. Г. Шинкаренко// НТЖ «Радиотехника».– 2007.№150, С. 151-158.

10. Семенець В. В. Введення в мікросистемну техніку та нанотехнології Навчальний посібник. [Текст]/ В. В. Семенець, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін / Харків «Копанія СМІТ», 2011. 416 с.

11. Технология межсоединений электронной аппаратуры: учебник/ Семенець В.В., Джон Кратц, Невлюдов И.Ш., Палагин В.А.– Харьков: «Компанія СМІТ», 20015 – 432с.