

РАЗРАБОТКА БАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

А. А. Сазонов, И. Б. Яшанин

ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седякова»

Элементами микросистемной техники (МСТ) называют устройства с интегрированными в объеме или на поверхности твердого тела электрическими, оптическими и микромеханическими структурами. Статическая или динамическая совокупность этих структур обеспечивает реализацию процессов генерации, преобразования, передачи энергии и механического движения в интеграции с процессами восприятия, обработки, передачи и хранения информации, действующие в требуемых условиях эксплуатации с заданными функциональными, энергетическими, временными и надежностными показателями.

МСТ имеет приоритетное значение для обеспечения атомно-ядерных технологий, экологической безопасности, развития биотехнологии и медицинского обслуживания населения, обеспечения энергоэффективности, энерго- и ресурсосбережения, космических технологий и телекоммуникаций, транспортных, авиационных и космических систем, индустрии наносистем и материалов, безопасности и противодействия терроризму, перспективных видов вооружения, военной и специальной техники.

Создаваемая в рамках направления «микросистемная техника» продукция характеризуется: инновационностью, наукоемкостью, конкурентоспособностью, потенциальной инвестируемостью на этапе разработки, массовостью производства, низкими материалоемкостью и энергоемкостью, широким рынком потребления.

В рамках данного направления создаются миниатюрные чувствительные (сенсорные) и исполнительные (актуаторные) системы, в основе функционирования которых лежит использование классических принципов механики, оптики, электротехники и физики твердого тела.

Ежегодно мировой объем производства МЭМС вырастает на 27 %, уже сегодня он составляет 2,5 млрд. изделий в год, но доля России в мировом рынке на сегодняшний день менее 1 %.

При создании изделий микросистемной техники по технологии поверхностной микрообработки часто используются технологические процессы, применяемые в традиционной КМОП-технологии. К таким процессам, в частности, относится нанесение технологических слоев оксида кремния, поликристаллического кремния, нитрида кремния, фосфорно-силикатного стекла и других [1]. В технологии МСТ указанные материалы могут использоваться в каче-

стве структурных, жертвенных и пассивирующих слоев. Следует отметить, что требования, предъявляемые к материалам структурных и жертвенных слоев, отличаются от требований к тождественным материалам, используемым в КМОП-технологии. Так, поликремний, используемый как структурный материал в изделии МСТ, характеризуется в первую очередь механическими свойствами [2]. При изготовлении же КМОП-структуры основными становятся электрофизические параметры поликремния. Кроме того, толщина слоев, применяемых в производстве изделий МСТ, обычно в разы превышает толщину аналогичных слоев, используемых в КМОП-технологии.

Разработка методов микрообработки кремния обеспечила быстрый прогресс в области микросистем. Под термином «микрообработка кремния» подразумевается формирование механических элементов микронных размеров внутри кремниевой подложки или на ее поверхности. Существуют две технологии микрообработки кремния: объемная микрообработка, при которой элементы системы вытравливаются внутри кремниевой подложки, и поверхностная микрообработка, при которой микромеханические слои формируются из пленок, осажденных на поверхность подложки.

В ходе анализа существующих достижений в этой области оптимальными для разработки в НИИИС выбраны групповые технологии поверхностной и объемной микромеханики, как наиболее близкие к существующему в институте микроэлектронному производству.

В ходе проведенных работ консультационную поддержку оказывали сотрудники ТЦ МИЭТ (г. Зеленоград).

К настоящему моменту в НИИИС изготовлены три тестовых кристалла:

- тестовый кристалл для определения механических свойств конструкционных слоев (ТКММ102);
- тестовый кристалл для отработки технологического маршрута поверхностной микромеханики (ТКММ101);
- тестовый кристалл для отработки технологического маршрута объемной микромеханики (ТКММ501).

Механические напряжения, возникающие в процессе формирования механических структур, приводят к их деформации. Величина и направление

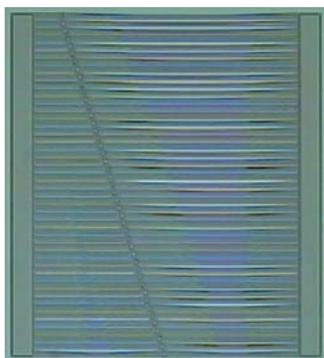


Рис. 1. Система балок ТКММ102

прогиба структур зависят от их размеров и условий формирования структурного слоя. При анализе величины деформаций можно сделать выводы, как о коррекции режимов технологических операций, так и о выборе конструкций реальных изделий МСТ с учетом ограничений, свойственных существующей технологии получения конструкционных слоев. Оценка величины деформаций может проводиться визуально (с помощью оптического микроскопа) и с использованием более точных методов (наблюдение и анализ положения интерференционных полос, использование атомно-силового микроскопа). На основании полученной информации можно рассчитать величину остаточных напряжений структурного материала.

Для определения механических свойств конструкционных слоев спроектирован тестовый кристалл ТКММ102. В его состав вошли несколько тестовых структур.

Тестовый элемент для качественной оценки залипания и остаточных напряжений при формировании балочных структур представляет собой систему балок различной длины (рис. 1). В конструкцию тестового элемента включены дополнительные опоры, назначение которых состоит в разделении балок, формируемых между основными опорами. За счет сдвига дополнительной опоры к центру соотношения длин балок, составляющих пару, постепенно изменяется. Такая конструкция позволяет обеспечить компактность тестового элемента при сохранении малого шага изменения длины балок. Длина балок изменяется от 100 до 1000 мкм с шагом 10 мкм. Ширина балок составляет 3, 5 и 8 мкм для каждой длины.

На рис. 2 изображен тестовый элемент для оценки деформаций консолей. Он представляет собой набор консолей различной длины. Длина консолей изменяется от 25 мкм до 325 мкм с шагом 5 мкм. Ширина консолей составляет 3, 5 и 8 мкм для каждой длины.

В каждом тестовом кристалле находятся наборы описанных выше структур с выступами и без выступов на нижней стороне балок и консолей. Выступы формируются для уменьшения площади контакта структур с подложкой и, как следствие, уменьшения адгезионных сил между структурами и подложкой. Такой прием используется для уменьшения количе-

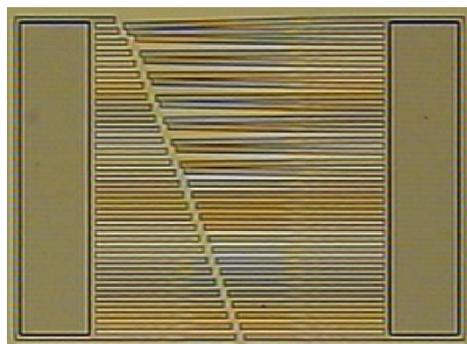


Рис. 2. Система консолей ТКММ102

ства прилипших к подложке после удаления жертвенного слоя элементов.

Процесс изготовления тестового кристалла включает 3 операции фотолитографии. На первом этапе на кремниевую подложку наносится слой оксида кремния, служащий опорой для структур (он называется опорным или жертвенным), и в нем вскрываются окна путем жидкостного химического или плазмохимического травления (рис. 3а). Затем наносится слой поликремния, из которого плазмохимическим травлением формируются механические структуры (рис. 3б). Далее жертвенный слой оксида удаляется, и на поверхности подложки образуются поликремниевые структуры, обладающие механической подвижностью (рис. 3в).

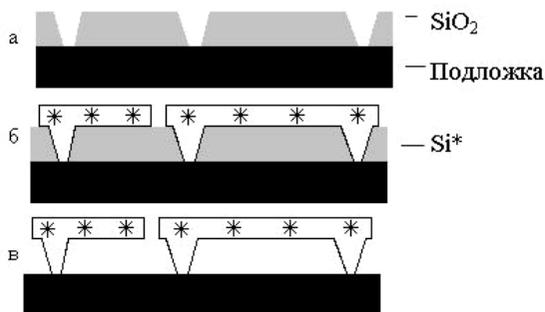


Рис. 3. Последовательность формирования слоев ТКММ102

Поликремниевая пленка имеет различное строение в объеме и в слое, граничащем с оксидом. Граничный слой имеет аморфную структуру и обладает меньшей способностью к рекристаллизации при отжиге из-за жесткой связи с SiO_2 . В то время как в объеме пленки начинается рекристаллизация поликремния и верхние слои «стягиваются», граничный слой остается стабильным [3]. Это приводит к изгибу балочных структур вниз после удаления жертвенного слоя. По этой причине материалом жертвенного слоя был выбран плазмохимический оксид кремния, т. к. он обладает высокой плотностью ($2,3 \text{ г/см}^3$).

Характер и величина остаточных напряжений в пленках поликремния зависят от ряда факторов: температуры и давления процесса осаждения, расхода реагента, положения пластины в реакторе и др. Влияние этих факторов исследовано эксперимен-

тально, однако установленные зависимости часто находятся в качественном и количественном противоречии. Так, например, температура перехода внутренних механических напряжений из растягивающих в сжимающие при осаждении при стандартном давлении силана 30–40 Па составляет согласно [4] приблизительно 580 °С, а согласно [5] 605 °С. Можно сделать вывод, что большинство факторов, определяющих конечные механические свойства поликремния, приводят для каждой конкретной установки осаждения к своей зависимости величины внутренних напряжений от параметров процесса. При изготовлении тестового кристалла температуру осаждения поликремния устанавливали равной 595 °С. Для снятия внутренних напряжений в поликремнии пластины отжигались в атмосфере сухого азота в течение 30 мин при температуре 1150 °С.

Длина не залипших балок составила 200–700 мкм (на отдельных пластинах до 1000 мкм). Наличие выступов на нижней стороне балок также привело к значительному увеличению длины не залипших элементов (на некоторых пластинах до 2-х раз). Средняя длина не прилипших к подложке консолей составила 115 мкм.

Полученные данные будут использованы при разработке конструкций и технологических маршрутов изготовления реальных изделий, например микрокоммутаторов, которые представляют собой также балки и консоли.

Тестовый кристалл ТКММ101 представляет собой преобразователь давления. На рис. 4 изображен преобразователь давления в разрезе. Основой его конструкции является круглая поликремниевая мембрана. По периметру мембрана жестко закреплена на подложке, давление в полости между мембраной и подложкой составляет 10–30 Па. На границе рабочей области мембраны сформированы два легированных бором поликремниевых тензорезистора, которые являются чувствительными элементами преобразователя. Рядом с тензорезисторами размещены два поликремниевых резистора постоянного сопротивления. Все четыре резистора объединены в мост Уинстона.

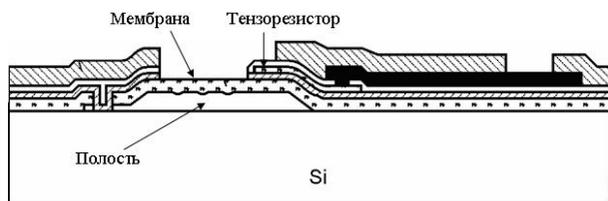


Рис. 4. Преобразователь давления в разрезе

Так как давление в полости постоянно, то при изменении внешнего давления мембрана деформируется, вместе с ней деформируются тензорезисторы и их сопротивление изменяется. Это влечет за собой разбалансирование плеч моста, и по величине разбаланса судят о величине изменения внешнего давления.

Изготовление преобразователя давления начинали с формирования жертвенного слоя. Он создавался в два этапа – сначала на пластинах выращивался термический оксид толщиной 0,6 мкм, затем на них осаждался слой CVD-SiO₂ толщиной 1 мкм, таким образом, суммарная толщина пленки оксида кремния составляла 1,6 мкм. Выполнялась фотолитография «Жертвенный слой», и жидкостным химическим травлением на пластинах формировался рисунок из слоя SiO₂.

При изготовлении тензорезистивного датчика давления круглые островки оксида кремния, формируемые на этом этапе, должны иметь наклонные стенки. Этому удалось достичь за счет изотропности жидкостного травления, что ведет к подтравливанию под резистивную маску, а также разности скорости травления оксида кремния, осажденного из газовой фазы, и полученного методом термического окисления.

На следующем этапе пластины окислялись на глубину 500Å. Выполнялась фотолитография «Капилляры», и с помощью ЖХТ SiO₂ формировался рисунок капилляров.

Затем осаждался слой поликристаллического кремния толщиной 1,0 мкм. Из него выполняется чувствительный элемент датчика давления – мембрана. Для снятия внутренних напряжений поликремния проводится отжиг при $t = 1150$ °С в течение 30 минут в атмосфере азота.

По слою поликремния выполнялась фотолитография «Окна травления», и с помощью ПХТ Si* вскрывались окна диаметром 3 мкм, обеспечивающие доступ к «жертвенному» слою. На рис. 5 схематически изображена полученная структура.

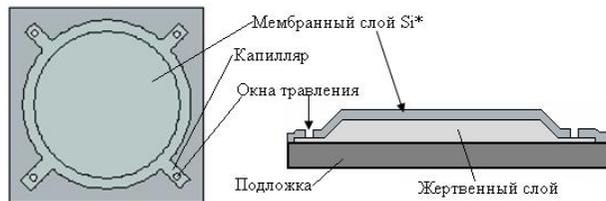


Рис. 5. Мембрана преобразователя давления

Травление жертвенного слоя проводилось в концентрированном растворе плавиковой кислоты. При подобной конструкции датчика давления скорость травления лимитируется малой толщиной капилляров и малыми размерами окон травления. По этим причинам средняя скорость продвижения фронта реакции составляет около 1 мкм/мин, в то время как скорость травления плавиковой кислотой открытой поверхности оксида кремния больше в 5–6 раз в зависимости от качества оксида.

Время травления подбиралось исходя из геометрических размеров вытравливаемых областей. На тестовом кристалле расположены мембраны с диаметрами 50, 75 и 100 мкм. Так как травление происходит от периферии к центру, то необходимое время

$$t = 0,5L_{\max}/v_{\text{тр}},$$

где L_{\max} – линейный размер наибольшей вытравливаемой области (100 мкм), $v_{\text{тр}}$ – скорость травления (1 мкм/мин). Исходя из расчетов, время травления, достаточное для удаления слоя SiO_2 , должно было составить 50 минут, что и подтвердилось на практике.

После изготовления мембран на пластинах были сформированы поликремниевые резисторы, выполнена металлическая разводка и пассивация поверхности фосфоро-силикатным стеклом. На рис. 6 изображена микрофотография преобразователя давления.

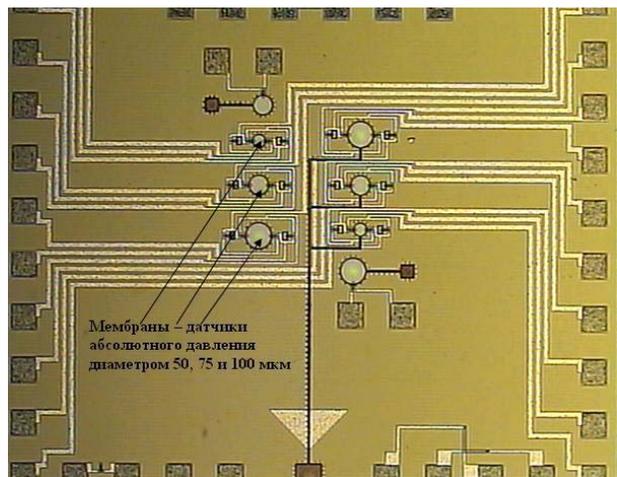


Рис. 6. Фотография тестового кристалла ТКММ101

Главной характеристикой тензорезистивного датчика давления является относительное изменение сопротивления тензорезистора при изменении давления. Согласно расчетам оно должно составлять порядка 1 % для датчиков с мембраной диаметром 100 мкм и 0,4 % для мембран диаметром 75 мкм. Нами были получены значения 0,86 % и 0,46 % соответственно. Изготовленные датчики прошли термотренировку при давлении 100–100000 Па в диапазоне температур -40 – $+80$ °С при напряжении питания 3 В. Они показали линейную зависимость выходного напряжения от давления, что является положительным результатом.

В рамках проведенных работ по технологии объемной микромеханики был изготовлен тестовый кристалл ТКММ501, в состав которого входят четыре электростатических микропривода, отличающиеся количеством гребенок (количеством конденсаторов) и способом крепления подвижной части.

На рис. 7 схематично изображен принцип действия микропривода. Он представляет собой выполненный из кремния подвижный блок 2, удерживаемый над полостью 4 за счет гибких пружин 3 и 3', соединяющих его с неподвижным элементом 1. При подаче напряжения на неподвижные элементы 1 и 1' между гребенками 5 и 5' появляется сила взаимодействия, которая вызывает их встречное движение. Подвижный элемент 2 отклоняется от исходного состояния за счет растяжения пружины 3 и сжатия

пружины 3'. После снятия заряда блок 2 возвращается в начальное положение.

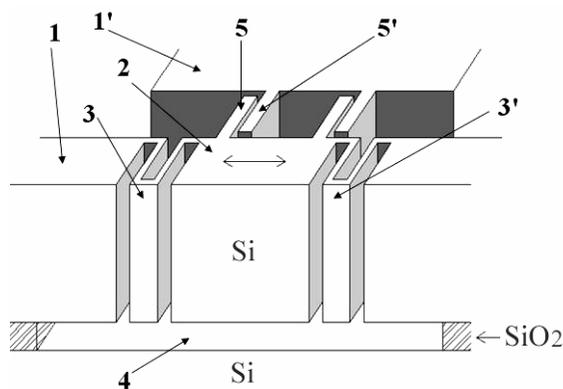


Рис. 7. Схематичное изображение и принцип действия микропривода

Подобный микропривод может быть использован для перемещения микрзеркал, замыкания/размыкания ключей, передвижения поршня и т. д.

Исходным материалом для изготовления кристаллов ТКММ501 являлись пластины КНИ с изоляционным слоем из SiO_2 толщиной 5 мкм и верхним рабочим низкоомным слоем кремния толщиной 30 мкм, сопротивление которого составляет не более 0,01 Ом·см.

Обработка пластин начинается с легирования верхнего рабочего слоя кремния диффузией фосфора с целью снижения поверхностного сопротивления кремния до значения 10 Ом/□. Далее следует окисление на глубину 0,8–0,9 мкм и осаждения слоя Si_3N_4 толщиной 0,1–0,15 мкм. Термический оксид предназначен для использования в качестве маски при глубоком анизотропном плазмохимическом травлении кремния. Слой Si_3N_4 служит стоп-слоем при формировании защитного слоя контактных площадок.

Выполняется фотолитография «Контактные окна», и с помощью плазмохимического травления слоев Si_3N_4 и SiO_2 вскрываются контактные окна к кремнию. Наносится слой алюминия толщиной 1,0 мкм, проводится фотолитография «Контактные площадки», и жидкостным химическим травлением формируются контактные площадки.

На следующем этапе проводится плазмохимическое осаждение слоя SiO_2 , проводится фотолитография «Защитный слой» и формируется защитный слой контактных площадок из SiO_2 .

Фотолитографией «Структура» формируется рисунок структуры микродвигателя и проводится плазмохимическое травление Si_3N_4 и SiO_2 до кремния.

Затем производится анизотропное плазмохимическое травление кремния на глубину 30 мкм. Стоп-слоем при травлении служит жертвенный слой толщиной 5. При травлении стравливается верхний слой

Si_3N_4 толщиной 0,1–0,15 мкм и частично слой SiO_2 . На рис. 8 приведена фотография микропривода.

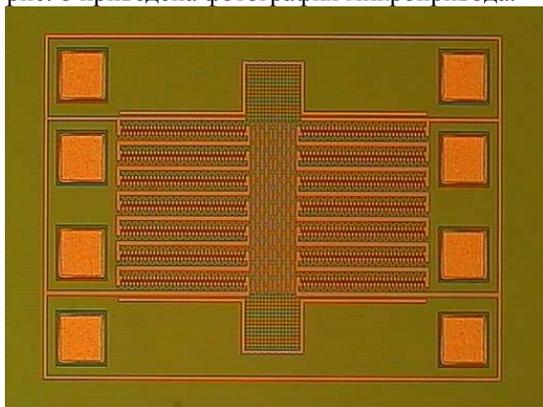


Рис. 8. Фотография микропривода

После этого проводится резка пластин на кристаллы, и жертвенный слой вытравливается в концентрированном водном растворе плавиковой кислоты.

Изготовленные микроприводы имеют амплитуду перемещения порядка 5–10 мкм.

Таким образом, в НИИИС разработаны два базовых технологических маршрута изготовления микроэлектромеханических систем – поверхностной и объемной микрообработки, которые при их незначительном изменении позволяют производить широкий

спектр изделий, входящих в номенклатуру изделий для первоочередной разработки и постановки на производство в НИИИС: акселерометры, датчики угловых скоростей, датчики давления, коммутационные изделия, инклинометры и двигатели.

Литература

1. Мальцев П. П., Телец В. А., Никифоров А. Ю. Технология и изделия микроэлектромеханики // Микросистемная техника. 2001. № 10. С. 18–24.
2. Распопов В. Я. Микромеханические приборы // Учебное пособие. Тул. гос. университет: Тула, 2002.
3. Годовицын И. В., Шелепин Н. А., Лыженкова Г. А. Формирование поверхностных микромеханических структур из пленок поликремния // Известия вузов. Электроника. 1997. № 2. С. 49–54.
4. Siegowcki S., Christenson T. et al. The application of fine-grained tensile polysilicon to mechanically resonant transducers. Sensors and Actuators. 1990. Vol. 21–23. P. 346–351.
5. P. Krulesitch, R. Howe, G. Johnson et al. Stress in undoped LPCVD polycrystalline silicon. Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators. June 1991. P. 957–960.