

И. А. Козин, электроник,
А. В. Постников, ст. науч. сотр.,
О. В. Морозов, ст. науч. сотр.,
 Ярославский филиал Учреждения Российской академии наук Физико-технологического института РАН, г. Ярославль, e-mail: KozinIlya.Yar@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С НАНЕСЕННОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ

Поступила в редакцию 04.10.2011

Исследуется влияние тонкой пленки алюминия 0,3 мкм на динамические характеристики микроэлектромеханического устройства с двумя вращательными степенями свободы. Определены собственные частоты и добротности механической колебательной системы устройства. В работе обнаружено влияние способа крепления устройства к механической системе возбуждения. Показано, что добротность устройства с металлизацией достигает 15–20 тысяч, что достаточно для работы прибора в приложениях, и позволяет сократить число технологических операций при изготовлении.

Ключевые слова: микроэлектромеханическое устройство, металлизация, добротность, крепление устройства, потери энергии микромеханического устройства

Одним из основных процессов технологии изготовления микроэлектромеханических устройств (ММУ) является плазменное травление кремния в Бош-процессе [1]. Использование слоя алюминия в качестве маски для травления кремния позволяет сократить число операций при изготовлении ММУ, что упрощает процесс изготовления. Кроме того, металлическая маска после формирования ММУ в процессе глубокого травления является контактной площадкой для разводки проводников. Металл, остающийся на поверхности прибора, может вносить неконтролируемые механические напряжения в прибор и ухудшать добротность колебательной системы ММУ [2]. Цель данной работы — исследование влияния тонких (0,3 мкм) слоев алюминия на резонансную частоту и добротность колебательной системы ММУ с двумя степенями свободы.

ММУ выполнено в объеме монокристаллической кремниевой пластины с использованием глубокого плазменного травления. ММУ (рис. 1) состоит из внутренней

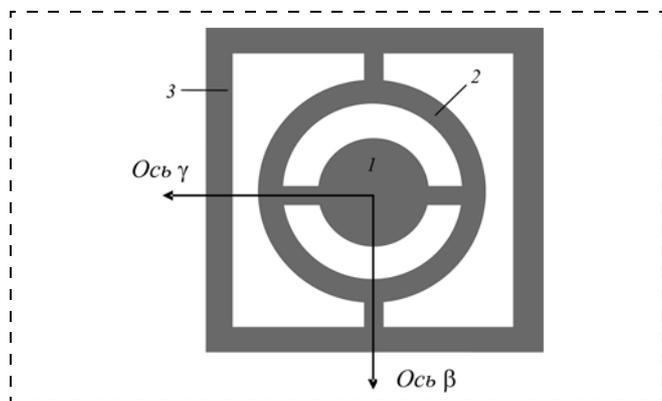


Рис. 1. Схема ММУ

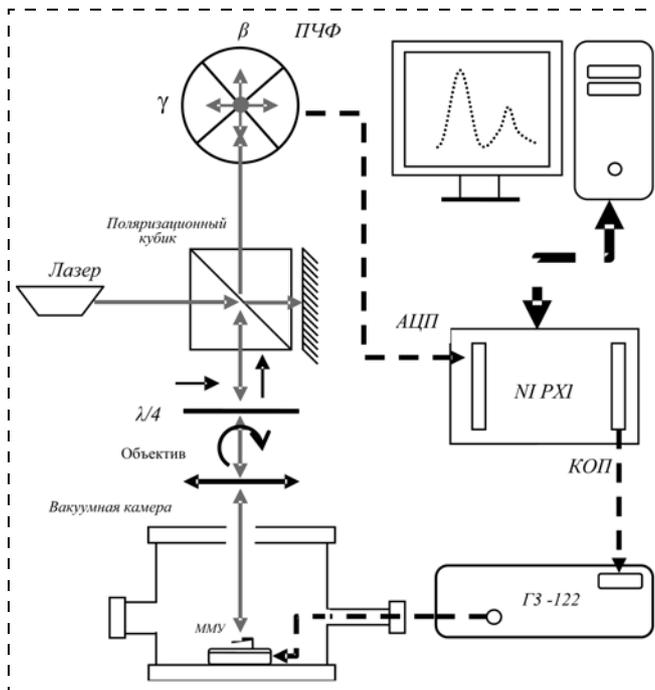


Рис. 2. Экспериментальная установка

подвижной массы 1, подвижного кольца 2 и основания 3. Масса, кольцо и основание соединены друг с другом посредством двух взаимно перпендикулярных пар торсионных подвесов прямоугольного сечения. Расположение подвесов обеспечивает две вращательные степени свободы. Вращение подвижной массы 1 вокруг оси γ и вращение кольца 2 вокруг оси β соответственно. Верхняя поверхность торсионных подвесов покрывается слоем алюминия.

На рис. 2 изображена экспериментальная установка для регистрации колебаний подвижных элементов ММУ. Образец, закрепленный на пьезоэлементе, помещен в вакуумную камеру. На пьезоэлемент подается синусоидальное напряжение от прецизионного генератора ГЗ-122 (дискретность задания частоты 0,001 Гц, погрешность $\pm 5 \cdot 10^{-5} \%$). Луч лазера фокусируется на поверхность подвижной массы, колебания которой вызывают отклонение отраженного луча, это отклонение фиксирует четырехсекторный позиционно-чувствительный фотоприемник (ПЧФ). Выходной сигнал фотоприемника формируется дифференциальными усилителями для каждой пары ПЧФ. Ширина полосы пропускания усилителей — 1 МГц. Фотоприемник устанавливается таким образом, чтобы отраженный луч точно падал в перекрестие границы секторов и одинаково освещал каждую из диагональных пар фотодиода. Контроль положения профиля массы ПЧФ осуществляется по измеряемым уровням выходных сигналов фотоприемника, двум сигналам, соответствующим разнице диагональных пар и сигналу суммы четырех секторов фотодиода. Минимальный обнаружимый угол, получаемый с применением данной методики регистрации углового отклонения, составил $0,01^\circ$. Автоматизация процесса сбора данных и управления генератором осуществляется с помощью модульной платформы PXI-1033 National Instruments и программного обеспечения, написанного в среде графического языка программирования LabView. Управление генератором ГЗ-122 выполняется с помощью контроллера КОП, установленного в платформе PXI. Сбор данных с ПЧФ происходит по трем ка-

налам с помощью карты АЦП с частотой дискретизации 250 кГц и разрядностью 12 бит.

Исследуемые ММУ устанавливали на механическую колебательную систему. Она представляет собой источник возбуждения колебаний — пьезоэлемент с жестко закрепленным фольгированным стеклотекстолитом. ММУ закрепляется на стеклотекстолите посредством упругих металлических держателей. В материале стеклотекстолита выполнено технологическое отверстие глубиной 1,5 мм, шириной 5 мм и длиной 7 мм. ММУ располагается на стеклотекстолите таким образом, чтобы его подвижные элементы находились в отверстии. Такая установка образца требуется для уменьшения эффекта сжатия воздушной пленки в зазоре между поверхностью пьезоэлемента и ММУ. Если в зазоре между двумя параллельными поверхностями находится воздух и этот зазор мал по сравнению с размерами поверхностей, то при движении поверхностей навстречу друг другу воздух в зазоре будет сжиматься и выдавливаться из зазора, оказывая сопротивление движению. Таким образом, при большом воздушном зазоре не будут происходить потери энергии на сжатие воздушной пленки, и как следствие — увеличение добротности механической колебательной системы.

ММУ помещали в вакуумную камеру. Рабочий объем камеры — 1 литр. Вакуумная камера соединена с ресивером объемом 10 литров. Измерения проводились при давлении 10 Па. Откачка выполнялась форвакуумными и турбомолекулярными насосами. Давление в камере контролировал датчик Пирани (погрешность $\pm 30\%$). Время съема резонансной кривой составляло приблизительно 20 мин. Во время съема резонансной кривой давление изменялось не более чем на 1 Па. Влияние изменения давления в камере в диапазоне 1...100 Па на доб-

ротность механических колебаний и собственных частот для данного ММУ незначительно.

В настоящей работе исследуются резонансные характеристики ММУ до нанесения металлизации на поверхность ММУ и после. На рис. 3, а, б представлены амплитудно-частотные характеристики колебаний ММУ. Наблюдаются две резонансные частоты, соответствующие двум осям колебаний γ и β . Разность резонансных частот задается конструктивно разной длиной торсионных подвесов. До нанесения слоя алюминия результаты измерений показали, что для всех тестируемых образцов значения добротностей для оси колебания γ лежат в диапазоне значений 3300...8500, для оси β — 4100...7500. Значения резонансных частот для оси γ — 4282,55...4302,58 Гц, $\Delta F_r = 20,03$ Гц, для оси β — 4323,54...4349,42 Гц, $\Delta F_r = 25,88$ Гц, соответственно. После нанесения тонкого слоя алюминия (0,3 мкм) на поверхность ММУ (рис. 3, а, б) значения добротностей для всех приборов для оси колебания γ лежат в диапазоне значений от 5000 до 6200, для оси β — от 3800 до 5900. Значения резонансных частот для оси γ — 4284,22...4303,23 Гц, $\Delta F_r = 19,01$ Гц, для оси β — 4324,55...4350,7 Гц, $\Delta F_r = 26,15$ Гц. Значения резонансных частот и добротности Q до и после нанесения металлизации для трех образцов представлены в таблице. Таким образом, из экспериментально полученных данных видно, что металлизация поверхности ММУ незначительно повлияла на изменение добротности и резонансных частот.

Проведение повторных измерений амплитудно-частотных характеристик ММУ показало, что наблюдается различие вычисленных значений Q и резонансных частот для всех тестируемых устройств до и после нанесения металлизации. Изменение значений добротностей колебаний, соответствующее осям γ и β , составляет 80 %, когда максимальная ошибка определения добротностей $\pm 3\%$. Значения резонансных частот колебаний для двух осей изменяются примерно на 1,3 Гц при допустимой ошибке $\pm 0,05$ Гц.

Разброс значений добротностей и резонансных частот может быть отнесен за счет различных значений потери энергии через основание ММУ [3], вследствие отсутствия контроля жесткости прижима образца. Так как жесткость крепления образца определяет основной механизм рассеяния данной колебательной системы, вследствие того, что отсутствуют другие источники потерь энергии, такие как молекулярное и вязкостное демпфирование, рассеяние, связанное с эффектом сжатия пленки. Отсутствие воспроизводимости механической колебательной системы пьезоэлемент—стеклотекстолит—держатели—ММУ является причиной такого разброса значений от эксперимента к эксперименту. Таким образом, для уменьшения потери энергии через основание и воспроизводимости колебательной системы было применено более жесткое крепление ММУ. Фиксация образца осуществлялась с помощью сплава Вуда. Сплав Вуда — это

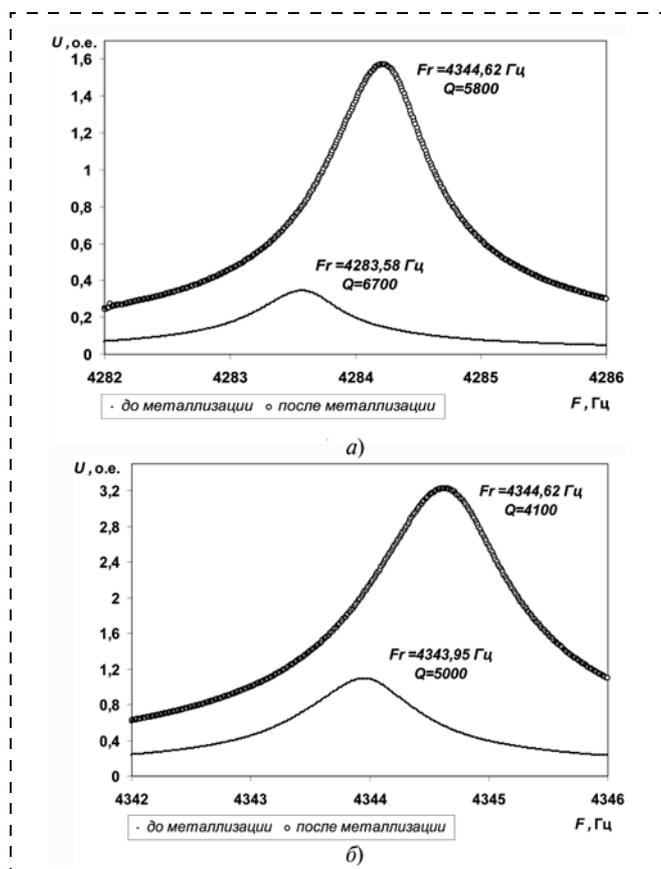


Рис. 3. АЧХ колебаний ММУ: а — для оси γ ; б — для оси β

№ образца	$F(\gamma)$, Гц	$F(\beta)$, Гц	$\Delta F = F(\beta) - F(\gamma)$, Гц	$Q(\gamma)$	$Q(\beta)$
До нанесения слоя алюминия (0,3 мкм)					
1	4302,58	4349,42	46,84	7000	4400
2	4288,86	4324,59	35,73	6700	4650
3	4282,55	4343,89	61,34	5800	4100
После нанесения слоя алюминия (0,3 мкм)					
1	4303,23	4350,7	47,47	6150	5300
2	4289,77	4325,4	35,63	6200	4400
3	4284,22	4344,62	60,4	5800	4050

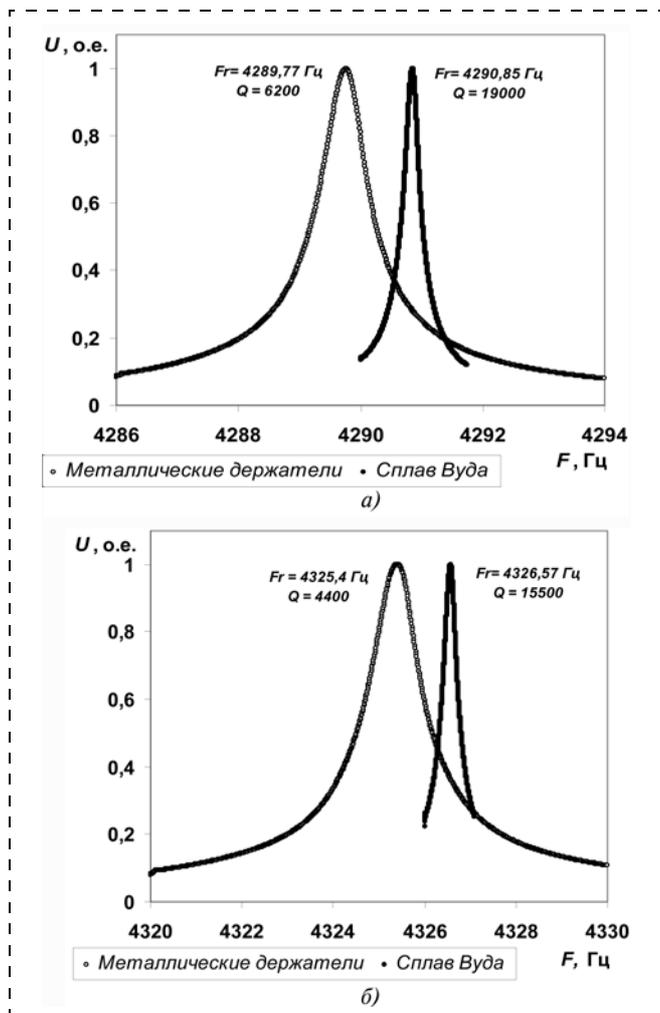


Рис. 4. АЧХ ММУ после нанесения металлизации:
 а — для оси γ ; б — для оси β

тяжелый легкоплавкий сплав, температура плавления $68,5^\circ\text{C}$. Состав: олово — 12,5 %, свинец — 25 %; висмут — 50 %; кадмий — 12,5 %. Обладает достаточно хорошей ад-

гезией к меди и плохой к кремнию. Образец был зафиксирован на четырех точках. Сплав Вуда припаявался к медной фольге, а затем с помощью горячего воздуха образец вдавливался в объем сплава. Таким образом получалось жесткое механическое крепление.

Результаты экспериментов показали, что добротности колебаний подвижных элементов ММУ при использовании более жесткого типа крепления для оси γ увеличились на 420 %, для оси β — на 330 %.

На рис. 4, а, б показаны амплитудно-частотные характеристики ММУ после металлизации при различных способах крепления образца с помощью механических держателей и сплава Вуда. Повторные эксперименты показали, что вычисленные значения добротностей не повторяются. Определение резонансных частот стало более точным, отсутствует большой разброс значений.

Таким образом, применение жесткого крепления ММУ позволило уменьшить рассеивание энергии через основание ММУ и тем самым значительно увеличить добротность механической колебательной системы. Отсутствие повторяемости добротности говорит о невоспроизводимости колебательной системы пьезоэлемент—сплав—ММУ и требует других методов возбуждения колебаний ММУ. Полученные экспериментальные значения добротности порядка 19 000 для оси γ и 15 500 для оси β достаточно для корректной работы данного микромеханического устройства. Из проведенных исследований следует, что нанесение слоя алюминия (0,3 мкм) незначительно изменяет добротность колебательной системы ММУ и, следовательно, позволяет изготавливать приборы с достаточным для работы значением добротности (15 000—20 000) при сокращении технологических стадий.

Список литературы

1. Laermer F., Urban A. Challenges, developments and application of silicon deep reactive ion etching. // *Microelectronic Engineering*. 2003. Vol. 67—68. P. 349—355.
2. Sosale G., Das K., Frechette L., Vengallatore S. Controlling damping and quality factors of silicon microcantilevers by selective metallization // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2011. Vol. 21.
3. Trusov A., Schofield A., Shkel A. A substrate energy dissipation mechanism in in-phase and anti-phase micromachined z-axis vibratory gyroscopes. // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2008. Vol. 18.