

УДК 681.586

И.И. АМИРОВ, О.В. МОРОЗОВ, И.В. УВАРОВ,
М.К. АМИНОВ, М.О. ИЗЮМОВ, В.А. КАЛЬНОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЕМНИЕВОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЦЕССОВ ГЛУБОКОГО АНИЗОТРОПНОГО ТРАВЛЕНИЯ

Введение

Микроакселерометры (МА) являются наиболее распространенными устройствами микроэлектромеханических систем (МЭМС). Они используются в аэрокосмической и автомобильной промышленности, в сотовых телефонах, в приборах военного и гражданского назначения. В настоящее время разработаны МА различного типа [1, 2]. МА емкостного типа, изготовленные по объемной технологии, обладают наибольшей чувствительностью. Технология изготовления МА зависит от его конструкции, но во всех случаях она включает операции плазмохимического травления кремния [3–6]. С разработкой глубокого анизотропного травления Si (Bosch-процесс) появилась возможность создания более чувствительных МА на основе высокоаспектных гребенчатых структур. Такие МА изготавливаются с использованием пластин КНИ (кремний на изоляторе) или утоненных кремниевых пластин, соединенных со стеклом (КНС – кремний на стекле) методом анодного сращивания [7–12].

Технология изготовления МА включает несколько этапов, на каждом из которых возможны отклонения от номинальных режимов. Поэтому для отработки технологии изготовления чувствительных элементов (ЧЭ) МА необходимо иметь методику контроля их параметров на разных стадиях изготовления [13, 14]. Такой контроль особенно важен после выполнения заключительной стадии изготовления ЧЭ – вывешивания чувствительной

массы. Вывешивание осуществляется в процессе проведения глубокого анизотропного травления канавочных структур разной ширины. В результате неизбежного перетрава, возникающего вследствие эффекта аспектнозависимого травления [15, 16], происходит растрав элементов МА, в результате чего его характеристики отличаются от расчетных.

Для контроля ухода емкостных характеристик МА от номинальных на стадии вывешивания можно использовать методику измерения напряжения резкого смыкания (pull-in) емкостных элементов [9, 17, 18]. Такие измерения можно рассматривать как экспресс-диагностику изготовления ЧЭ. Кроме того, для отработки технологии изготовления необходимо измерять такие характеристики прибора, как резонансные частота и коэффициент демпфирования. При изготовлении современных МА на заключительном этапе проводят его самокалибровку [19, 20]. В данной работе представлена технология изготовления ЧЭ гребенчатого типа на пластине КНС [21], а также ЧЭ маятникового типа на кремниевой пластине

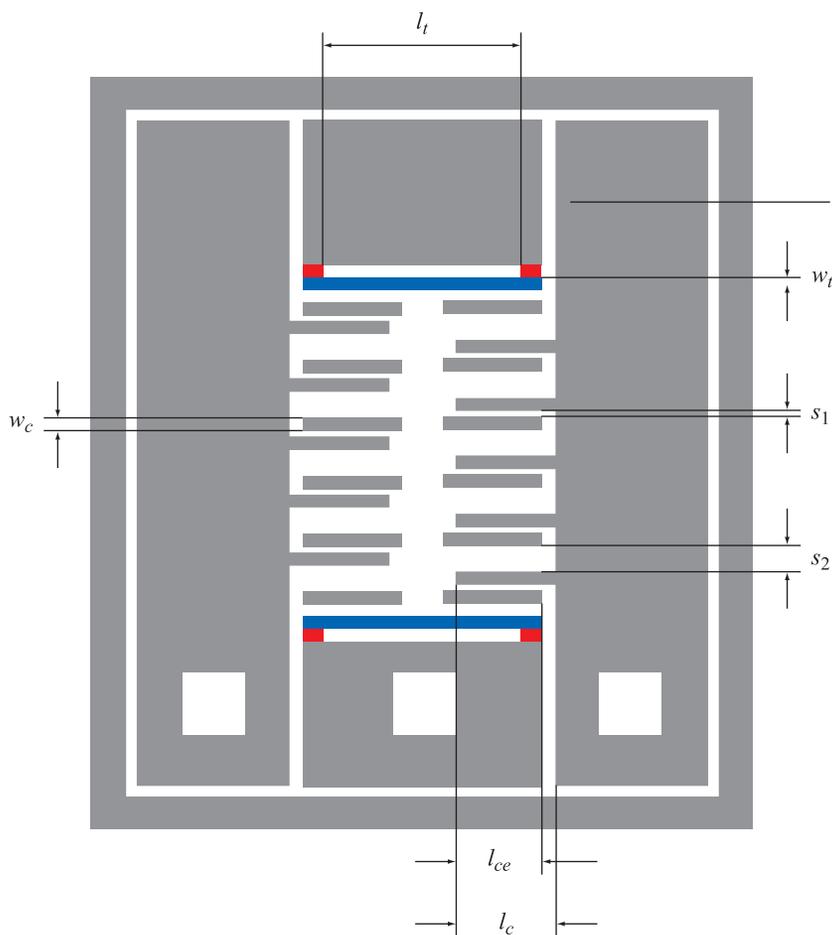


Рис.1. Схема чувствительного элемента микроакселерометра

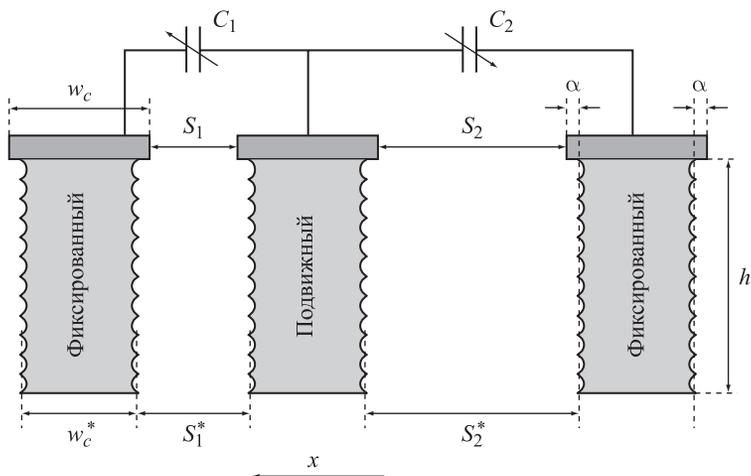


Рис. 2. Схема фрагмента встречно-штыревой структуры ЧЭ

с использованием процессов глубокого анизотропного травления [22]. Представлена методика экспресс-диагностики процесса изготовления и методика измерения динамических характеристик ЧЭ.

1. Конструкция ЧЭ МА гребенчатого типа на основе высокоаспектных встречно-штыревых структур и технология его изготовления

Расчет конструкции ЧЭ МА гребенчатого типа с высокоаспектными встречно-штыревыми структурами (ВШС) на пластинах КНИ или КНС подробно рассмотрен в работе [7]. Упрощенная схема дифференциального ЧЭ показана на рис. 1. ЧЭ состоит из чувствительной массы, вывешенной на пружинном подвесе (длина 490 мкм, ширина 5.5 мкм), и двух наборов встречно-штыревых структур (длина зубцов $l_c = 175$ мкм, ширина $w_c = 10$ мкм, зазор между зубцами составляет 3 и 11 мкм), образующих два конденсатора емкостью C_1 и C_2 (рис. 2). При возникновении ускорения одна из емкостей увеличивается, а другая уменьшается, так что их разность увеличивается. Окружающий воздух является демпфирующей средой. Перемещение чувствительной массы ведет к изменению межэлектродной емкости, которое детектируется схемой измерения.

1.1. Основные операции технологии изготовления ЧЭ «кремний на стекле»

Изготовление ЧЭ МА осуществлялось с использованием окисленных (толщина SiO_2 0.85 мкм) кремниевых пластин (100) КДБ 1 диаметром 100 мм. При изготовлении использовался процесс анодного сращивания стеклянной пластины марки ЛК5 с кремниевой пластиной. Процесс сращивания проводился после формирования приборного слоя методом анизотропного плазменного травления полости в пластине кремния. Формирование составных частей ЧЭ проводилось методом анизотропного плазменного травления через всю

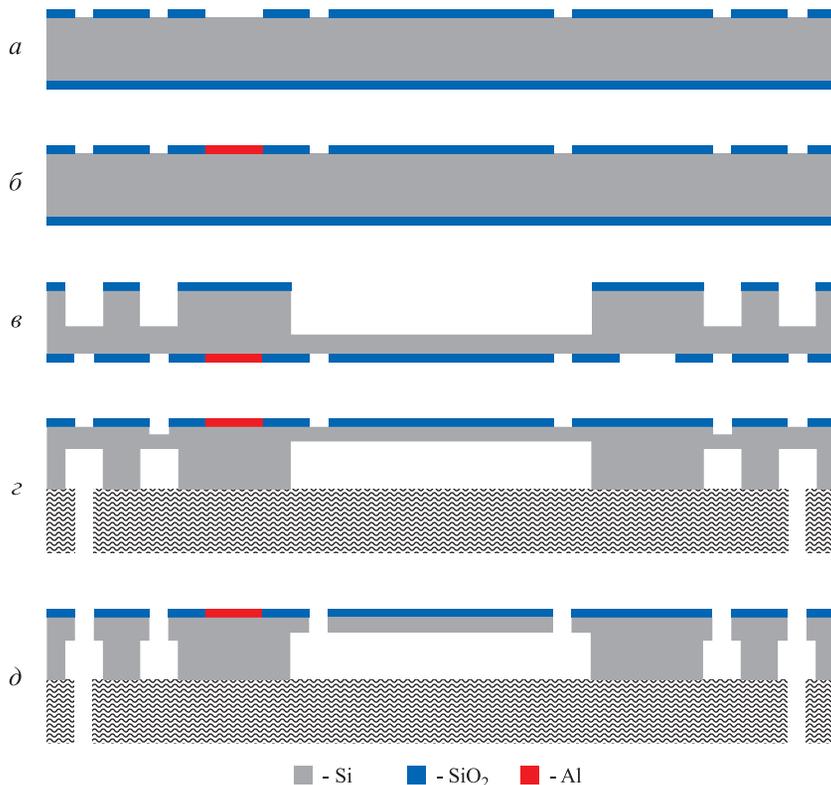


Рис. 3. Последовательность изготовления ЧЭ МА «кремний на стекле»: *a* – формирование SiO₂ маски рисунка МА гребенчатого типа на лицевой стороне пластины (фотолитография № 1); *б* – формирование Al контактных площадок (металлизация) (фотолитография № 2); *в* – формирование масок приборного слоя и встречно-штыревых структур (фотографии: № 3 по тыльной стороне с двухсторонним смещением и № 4 по лицевой стороне пластины). Формирование приборного слоя, Глубокое плазменное травление кремния с тыльной стороны пластины; *г* – формирование структуры «кремний на стекле»: жидкостное травление SiO₂ на тыльной стороне пластины, анодное сращивание Si тыльной стороны пластины со стеклом в вакууме, разделение стеклянной пластины на чипы с тыльной стороны до Si (резка); *д* – освобождение чувствительной массы: сквозное плазменное травление высокоаспектных канавок в приборном слое Si

толщину приборного слоя структуры «кремний на стекле». Технологический маршрут включал 4 литографические операции. Он состоял из 6 этапов и следующих основных операций (рис. 3):

Формирование приборного слоя толщиной 50–60 мкм проводилось в пластине монокристаллического кремния толщиной 390 мкм. Глубина травления полостей с тыльной стороны пластины составляла 330–340 мкм. Маска для глубокого плазменного травления с тыльной стороны пластины включала окна площадью около 4 мм² для формирования полости, а также линии для разделения пластины на приборы.

Ширина линий существенно меньше размеров приборного окна, что определяет разную глубину травления канавок и полости. Это вызвано

зависимостью скорости травления от аспектного отношения структур, получаемых методом плазменного травления. Другой особенностью применения метода глубокого плазменного травления для формирования приборного слоя является характерный профиль полости (рис. 4). Возникновение такого профиля необходимо учитывать при разработке технологии изготовления ЧЭ. Заключительной стадией процесса являлось сквозное плазменное травление ВШС в приборном слое (Bosch-процесс) для вывешивания чувствительной массы. Контроль травления осуществлялся по времени анизотропного травления канавок минимальной ширины. Аспектное отношение канавок достигало 20.

Особенностью анизотропного травления кремниевых ВШС на диэлектрике является резкое нарушение условий проведения процесса на заключительном этапе травления. При одновременном травлении узких и широких канавок, когда травление Si заканчивается в широких канавках, теплоотвод через подвесы нарушается. В результате происходит резкое увеличение температуры чувствительной массы и элементов гребенчатых структур. В зависимости от условий травления температура подвижных элементов может увеличиться существенно [23]. Значительный рост температуры приводит к ухудшению условий анизотропного травления узких канавок, к увеличению изотропной составляющей травления. Вследствие этого уменьшается ширина

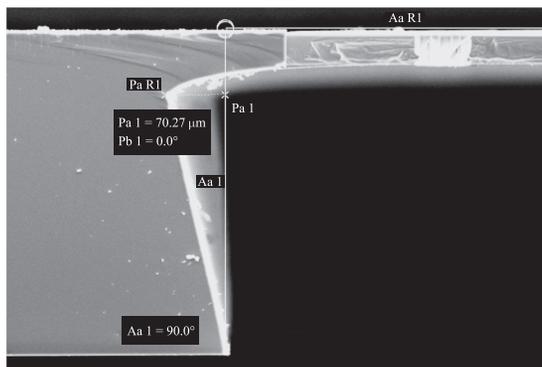


Рис. 4. Вид скола пластины Si в месте приборного слоя после проведения процесса глубокого травления Si

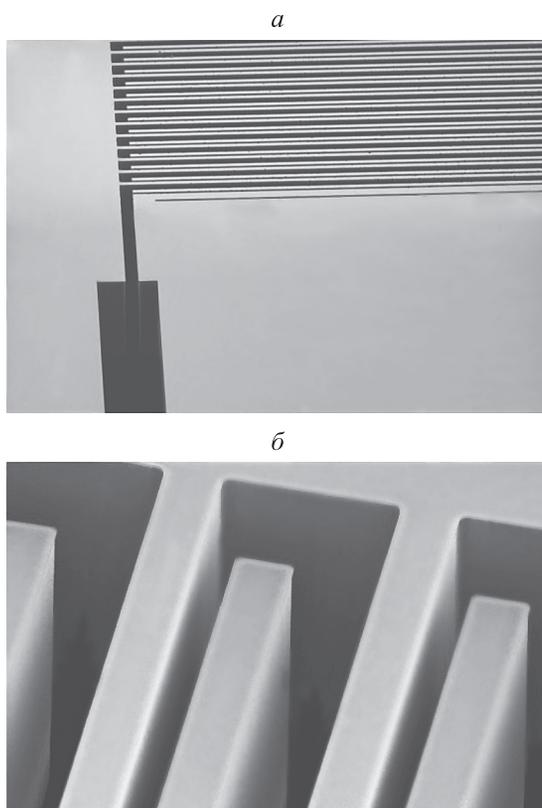


Рис. 5. Вид отдельных элементов ЧЭ МА, полученных после заключительной операции: а – фрагмент ЧЭ, включающий ВШС статические и подвижные гребенки на инерционной массе; б – фрагмент высокоаспектных ВШС

ребенок. Продолжение процесса травления в таких условиях приводит также к уменьшению ширины подвесов, увеличению межэлектродного расстояния. Все это ведет к изменению чувствительности прибора. Снизить рост температуры можно путем усиления стадии пассивации на заключительном этапе травления. В этом случае боковой уход размеров ВШС почти не наблюдается (рис. 5). Стоит отметить, что в результате перетрава не происходит уменьшение высоты ВШС, как это наблюдается в случае их травления на пластине КНС (эффект поправа, *notching effect*) [16]. Это обусловлено тем, что при изготовлении ЧЭ на пластине «кремний на стекле» не проявляется эффект зарядки [24].

Основные характеристики ЧЭ микромеханического акселерометра — масса инерциального элемента и электрическая емкость конденсаторов — зависят от толщины приборного слоя. Чем больше толщина приборного слоя, тем больше масса и площадь между обкладками конденсаторов (емкость), что улучшает рабочие характеристики датчика. Емкость конденсаторов может быть увеличена путем уменьшения зазора между обкладками конденсаторов. Таким образом, желательно увеличивать соотношение толщины приборного слоя и величины зазора, то есть увеличивать аспектное отношение ВШС. Однако, как было показано в работе [7], существует некоторая оптимальная толщина прибора. Увеличение емкости за счет увеличения аспектного отношения структур не ведет к повышению чувствительности, так как при этом увеличивается шум. Поэтому существует оптимальное аспектное отношение ВШС, равное 20. С технологической точки зрения это также оптимальная величина, так как травление канавок с таким аспектным отношением характеризуется высокой воспроизводимостью. Толщина приборного слоя пластины составляет обычно 50–60 мкм при величине зазора 2–3 мкм [7, 9–11].

1.2. Технология изготовления ЧЭ МА маятникового типа

ЧЭ МА маятникового типа представляет собой инерционную массу (ИМ), вывешенную на двух микробалках (рис. 6). На противоположной стороне от подвесов ИМ имеет ВШС. Она предназначена для реализации емкостного считывания сигнала или для высокочувствительного интерферометрического метода детектирования перемещения ИМ [25]. Параметры МА определялись конструкцией и степенью демпфирования его ЧЭ. Демпфирование, обусловленное сопротивлением воздуха, зависит не только от величины воздушного зазора вокруг ЧЭ, но также и от геометрии ЧЭ. С целью повышения демпфирования ИМ была снабжена мембраной. Размеры мембраны составляли 1.4×1.4 мм, величина ИМ составляла 2.3 мг. Были изготовлены образцы с толщиной подвесов от 12 до 25 мкм.

Технология изготовления ЧЭ была наиболее простой для реализации интерферометрического метода считывания сигнала перемещения ИМ. Она включала две двухсторонние фотолитографические операции. На лицевой стороне формировалась Cr/SiO₂ маска с рисунком ЧЭ МА. На тыльной стороне формировалась маска SiO₂ с рисунком мембраны и инерционной массы. Изготовление ЧЭ выполнялось в результате проведения двух процессов глубокого анизотропного травления Si (Bosch-процесс). Сначала проводили травление Si с тыльной стороны для формирования

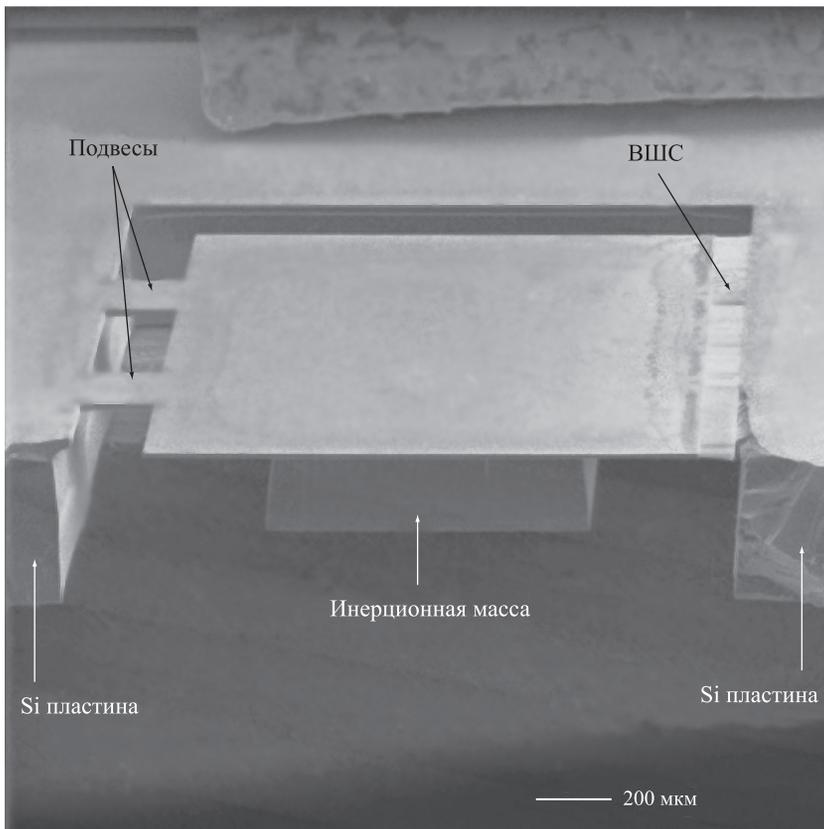


Рис. 6. Вид ЧЭ МА маятникового типа

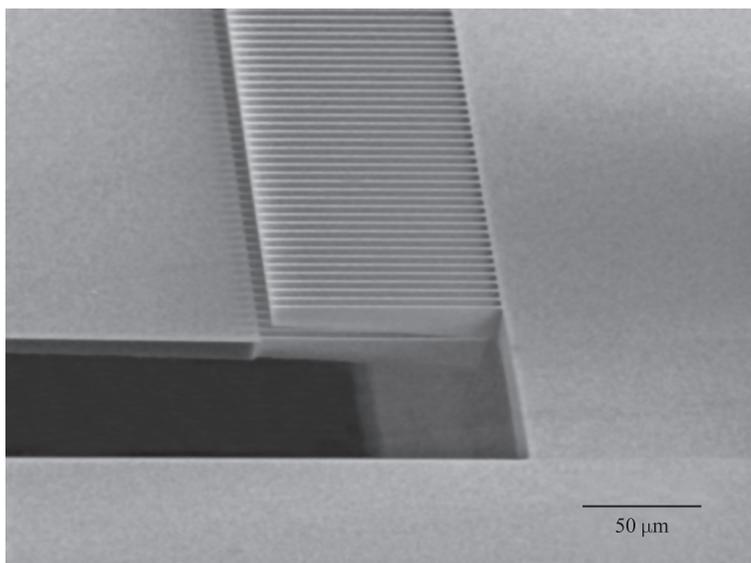


Рис. 7. Вид встречно-штыревых структур ЧЭ МА маятникового типа

мембраны, а затем осуществляли глубокое анизотропное травление Si для формирования ВШС (рис. 7).

1.3. Резонансные характеристики ЧЭ МА маятникового типа

Измерение резонансных характеристик проводилось оптическим методом на специальном стенде, схема которого подробно представлена в работах [22, 26]. Образец закреплялся на пьезоэлементе (воздушный зазор между поверхностью ИМ и поверхностью пьезоэлемента составлял 200 мкм) и помещался в вакуумную камеру. Для возбуждения колебания ИМ на пьезоэлемент подавалось переменное напряжение от генератора ГЗ–122. Луч лазера фокусировался на поверхность ИМ, колебания которой вызывали отклонение отраженного луча от начального положения, это отклонение фиксировалось фотоприемником. Сбор данных с фотоприемника, а также управление генератором ГЗ–122 осуществлялись с помощью платформы PXI National Instruments и программного обеспечения, написанного в среде графического программирования LabView. Измерения проводились при различных значениях давления воздуха в камере (от 1 до 10^5 Па). По резонансным характеристикам определялись резонансные частоты и добротности ЧЭ. Добротность рассчитывалась по отношению резонансной частоты к ширине резонансного пика по частоте на уровне убывания его высоты в $\sqrt{2}$ раз. Основная резонансная частота балки длиной L , толщиной t и выполненной из материала с модулем Юнга ρ и плотностью ρ задается выражением

$$F_p = 1.03 \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (1)$$

Согласно (1), резонансная частота F_p балки пропорциональна ее толщине. Подвесы ИМ имели более сложную форму, поэтому зависимость резонансной частоты ЧЭ от толщины подвесов была смоделирована в пакете COMSOL Multiphysics (метод конечных элементов). Полученные резонансные частоты ЧЭ находились в согласии с экспериментальными данными. Резонансная частота ЧЭ линейно возрастала от 500 Гц до 3 кГц при увеличении толщины подвесов от 12 до 25 мкм.

В зависимости от давления воздуха в диапазоне от 1 до 10^5 Па наблюдалось значительное изменение добротности ЧЭ МА (рис. 8). Рассматриваемый диапазон давлений можно было разбить на три области, на каждом из которых преобладал соответствующий источник потерь энергии. В диапазоне от 1 до 10 Па основную роль играли потери энергии, происходящие в подвесах ЧЭ при их изгибе. В данном диапазоне добротность ЧЭ достигала максимальной величины и слабо зависела от давления. Исследуемые образцы имели добротность от 3000 до 13000. Диапазон давлений от 10 до 10^3 Па соответствовал молекулярному режиму демпфирования. Добротность ЧЭ в таком режиме уменьшалась с увеличением давления воздуха в камере. Давлению воздуха от 10^3 до 10^5 Па соответствовал вязкостный режим, при этом добротность ЧЭ также слабо зависела от давления и достигала минимальной величины.

При изменении давления от 1 до 10^5 Па наблюдался небольшой сдвиг резонансной частоты образцов. Чем выше было значение резонансной частоты

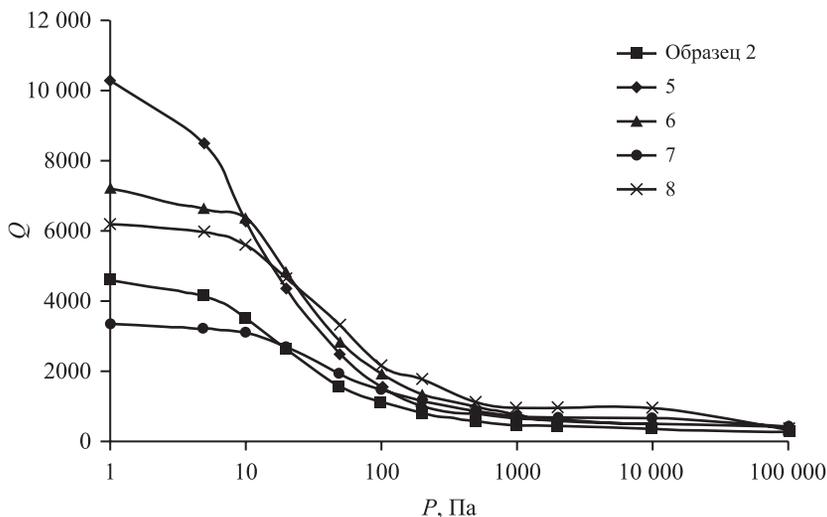


Рис. 8. Зависимость добротности колебаний нескольких образцов от давления

образца, тем сильнее она смещалась по абсолютной величине при переходе от вакуума к стандартным условиям. Но относительное смещение резонансной частоты для всех образцов было небольшим, оно не превышало 0.3%.

При измерении ускорения с целью подавления нежелательных колебаний необходимо, чтобы коэффициент демпфирования ξ ЧЭ составлял около 0,5. Это соответствует добротности порядка 1 ($Q = 1/2\xi$) [2]. Для задания требуемого коэффициента демпфирования в инерциальных микромеханических устройствах широко используется эффект сжатия воздуха в зазоре между элементами устройства. Добротность ЧЭ определяется выражением [10]:

$$Q = \frac{F_p m \pi^4 h_0^3}{96 \eta L W^3}, \quad (2)$$

где F_p – резонансная частота ЧЭ; h_0 – толщина воздушного зазора; η – вязкость воздуха; L и W – длина и ширина поверхности ЧЭ, создающей сжатие воздуха.

Зависимость добротности колебаний ЧЭ от величины воздушного зазора между поверхностью мембраны и поверхностью, на которую устанавливался ЧЭ (поверхностью пьезоэлемента) представлена на рис. 9. Измерения проводились при атмосферном давлении (вязкостный режим). Для создания различных воздушных зазоров образцы устанавливались на полиимидные пленки различной толщины (30, 40, 45, 70, 85 и 145 мкм). Толщина пленок определялась микрометром с точностью 1 мкм. На графике представлена также теоретическая кривая, рассчитанная с помощью выражения (2) для ЧЭ, имеющего резонансную частоту 1 кГц. При воздушных зазорах от 30 до 100 мкм экспериментальные кривые лежали выше теоретической. Возможно, это было связано с ошибкой в определении величины воздушного зазора. Воздушный зазор превышал измеренную толщину используемых полиимидных пленок из-за наличия посторонних частиц между пленкой и образцом и шероховатостей пленок. Также ошибками в определении

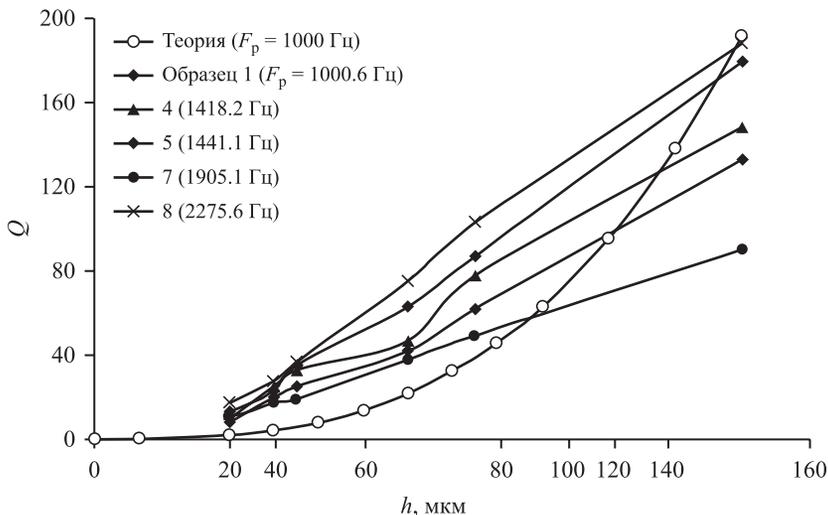


Рис. 9. Зависимость добротности колебаний ЧЭ между поверхностью мембраной и поверхностью пьезоэлемента

величины зазора могли быть обусловлены изгибы экспериментальных кривых в области 40–45 мкм. Однако при зазорах 100–140 мкм экспериментальные кривые не уходили вверх так круто, как теоретическая кривая. Это было связано с тем, что с увеличением величины зазора эффект сжатия воздуха на самом деле постепенно ослабевал и экспериментальные кривые выходили на насыщение.

Выше было отмечено, что для подавления нежелательных колебаний акселерометра необходимо, чтобы коэффициент демпфирования ξ составлял ~ 0.5 . Экстраполяция экспериментально полученных зависимостей (см. рис. 9) на диапазон $h < 30$ мкм показывает, что требуемое значение добротности для ЧЭ исследуемой конструкции должно достигаться при $h \approx 20$ мкм.

Порог чувствительности ЧЭ по ускорению был определен из отношения сигнал/шум (SNR) [7]:

$$\text{SNR} = \frac{a_s^2 m Q}{4k_b T \omega_0}, \quad (3)$$

где a_s – измеряемое ускорение; k_b – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура. В качестве шума в выражении (3) выступает броуновский шум ЧЭ. Отношение сигнал/шум полагалось равным 1. Порог чувствительности ЧЭ, имеющего массу 2.3 мг, резонансную частоту порядка 1 кГц и обладающего добротностью, равной 5, составлял 1×10^{-6} м/с² (0.1 мкг), что соответствует порогу чувствительности современных МА.

1.4 Резонансные характеристики ЧЭ МА гребенчатого типа на основе высокоаспектных встречно-штыревых структур

Измерение резонансных характеристик (резонансной частоты, добротности) ЧЭ МА также выполнялось на оптическом стенде. Возбуждение

колебаний инерционной массы ЧЭ осуществлялось электростатическим методом. Переменное (синусоидальное) напряжение подавалось на контактные площадки ЧЭ. Регистрация колебаний ИМ выполнялась методом светового рычага. Колебания происходили в плоскости образца, угловое отклонение ИМ от начального положения отсутствовало. Луч лазера устанавливался на границу ИМ. Когда ИМ перемещалась, изменялось количество света, отраженного от ее поверхности. Соответственно, изменялась интенсивность света, попадающего на фотоприемник (ФП). Измерения резонансных характеристик проводились при давлении воздуха 0.01 мбар, так как при атмосферном давлении резонанс не наблюдался вследствие сильного затухания. Исследуемый ЧЭ при этом помещался в вакуумную камеру измерительного стенда, луч лазера попадал на ЧЭ через стеклянное окно в камере. Строилась резонансная кривая образца, по которой определялись резонансные частоты и добротности ЧЭ. Согласно расчетам, акселерометр с номинальной толщиной подвесов 5.5 мкм должен иметь собственную частоту в диапазоне 2.2–2.9 кГц, с толщиной 6.5 мкм – в диапазоне 3.0–3.8 кГц. Измеренные резонансные частоты были в расчетном диапазоне.

2. Методика определения величины уменьшения ширины ВШС и пружины ЧЭ МА по величине напряжения схлопывания

Методика расчета зависимости ширины ВШС и пружинных элементов по величине напряжения схлопывания предложена в работах [17, 18]. Сечение фрагмента ВШС схематично показано на рис. 2. Подвижные зубцы чувствительной массы расположены несимметрично между неподвижными зубцами гребенки. Зубцы гребенок имеют рифленные стенки, что является результатом глубокого плазменного травления кремния. С каждой стороны зубца имеется подтрав под маску величиной α (технологический подтрав). Емкость гребенок ВШС определяется следующим выражением:

$$C(x) = C_1(x) + C_2(x) = \frac{n_c}{2} \epsilon_0 l_{ce} h \left(\frac{1}{s_1^* - x} + \frac{1}{s_2^* + x} \right), \quad (4)$$

где x – перемещение подвижного зубца относительно исходного положения под действием внешней силы; n_c – количество пар зубцов встречно-штыревой структуры; ϵ_0 – электрическая постоянная; l_{ce} – длина перекрытия зубцов; h – толщина приборного слоя, s_1^* и s_2^* – зазоры № 1 и № 2 с учетом бокового подтрав. Боковой подтрав приводит также к уменьшению длины перекрытия зубцов, но так как он намного меньше l_{ce} , то его влияние можно не учитывать. Подтрав ведет к расширению зазоров между зубцами:

$$s_1^* = s_1 + 2\alpha, \quad (5)$$

$$s_2^* = s_2 + 2\alpha, \quad (6)$$

где s_1 и s_2 – зазоры без учета подтрав (номинальный размер), α – боковой подтрав.

Если между подвижной и неподвижной гребенками прикладывается электрическое напряжение V , то между зубцами возникает электростатическая сила,

под действием которой подвижная масса вместе с гребенками переместится на некоторую величину x в направлении, обозначенном стрелкой на рис. 2. Электростатическая сила задается выражением

$$F_{\text{es}} = \frac{1}{2} \frac{\partial C(x)}{\partial x} V^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial C_1(x)}{\partial x} + \frac{\partial C_2(x)}{\partial x} \right) V^2. \quad (7)$$

Перемещение подвижной массы вызывает деформацию подвесов, в них возникает сила упругости:

$$F_{\text{sp}} = k \cdot x. \quad (8)$$

Если прикладываемое напряжение постепенно увеличивать, то при некотором его значении V_{pi} электростатическая сила станет больше силы упругости и произойдет резкое перемещение чувствительной массы – электростатическое схлопывание (pull-in). Константа упругости подвесов, на которых крепится подвижная масса микромеханического акселерометра, задается следующим выражением:

$$k = n_t E h \left(\frac{w_t^*}{l_t^*} \right)^3, \quad (9)$$

где n_t – количество пружинных подвесов; E – модуль Юнга Si (169 ГПа); h , l_t^* и w_t^* – толщина, длина и ширина подвесов с учетом бокового подтрав. Подтрав увеличивает длину подвеса и сужает его. Однако, так как длина подвеса (490 мкм) намного больше подтравы, то его можно не учитывать. Ширина подвесов будет определяться выражением

$$w_t^* = w_t - 2\alpha, \quad (10)$$

где w_t – ширина подвеса без учета подтравы (номинальный размер).

Для нахождения напряжения схлопывания рассмотрим потенциальную энергию системы. Она складывается из энергии упругой деформации подвесов и энергии, запасенной в ВШС как в конденсаторе:

$$U(x, V) = U_{\text{elastic}}(x) + U_{\text{electric}}(x, V) = \frac{kx^2}{2} - \frac{C(x)V^2}{2}. \quad (11)$$

Смещение подвижной массы и прикладываемое напряжение, при котором происходит схлопывание (x_{pi} , V_{pi}), определяются из решения системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{dU(x, V)}{dx} = 0; \\ \frac{d^2U(x, V)}{dx^2} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Первое уравнение системы (12) является условием равенства электростатической и упругой сил, второе – условием потери стабильности положения равновесия.

Емкость C_2 в рассматриваемой конструкции ЧЭ существенно меньше, чем C_1 , и при расчетах напряжения схлопывания ею можно пренебречь ($C_2 = 0$). В этом случае емкость ВШС задается выражением

$$C(x) = C_1(x) = \frac{n_c}{2} \varepsilon_0 l_{ce} h \frac{1}{s_1^* - x}. \quad (13)$$

Подстановка формулы (13) в выражение для потенциальной энергии (8) дает следующий вид системы уравнений (9):

$$\left\{ \begin{array}{l} kx - \frac{n_c \varepsilon_0 l_{ce} h V^2}{4} \frac{1}{(s_1^* - x)^2} = 0; \\ k - \frac{n_c \varepsilon_0 l_{ce} h V^2}{2} \frac{1}{(s_1^* - x)^3} = 0, \end{array} \right. \quad (14)$$

где константа упругости k задается выражением (9). Решая систему (14), можно получить выражение для перемещения подвижной массы, при котором происходит схлопывание, и напряжения схлопывания:

$$x_{pi} = \frac{1}{3} s_1^*, \quad (15)$$

$$V_{pi} = \sqrt{\frac{16}{27} \frac{n_t E}{n_c \varepsilon l_{ce}} \left(\frac{w_t^* s_1^*}{l_t} \right)^3}. \quad (16)$$

Согласно (15), схлопывание происходит при перемещении подвижной массы на одну треть зазора s_1^* между зубцами гребенки. Выражение (16) представляет собой зависимость V_{pi} от номинальных значений параметров конструкции ЧЭ, а также от глубины подтрава под маску, поскольку величины w_t^* , s_1^* являются функциями α . Зависимость напряжения V_{pi} от величины подтрава определяется следующим выражением:

$$V_{pi} = \sqrt{\frac{16}{27} \frac{n_t E}{n_c \varepsilon (l_{ce})} \frac{(w_t - 2\alpha)^3 (s_1 + 2\alpha)^3}{(l_t)^3}}. \quad (17)$$

Такие зависимости для ЧЭ с номинальной шириной подвесов 5.5 и 6.5 мкм в диапазоне подтрава от 0 до 1 мкм представлены на рис. 10. Технологический уход у изготовленных образцов ЧЭ, боковой уход ширины гребенок и пружинных подвесов задавали равным 0.25 мкм.

Зависимость напряжения схлопывания от глубины подтрава имеет форму колокола, то есть при увеличении подтрава наблюдается сначала рост напряжения схлопывания, а затем некоторый спад. Такая форма зависимости обусловлена влиянием подтрава на два фактора, определяющие напряжение схлопывания: электростатическую силу, которую развивает встречно-штыревая структура, и силу реакции подвесов. С одной стороны, с увеличением подтрава зазоры между зубцами увеличиваются, емкость ВШС падает и уменьшается электростатическая сила. Следовательно, напряжение

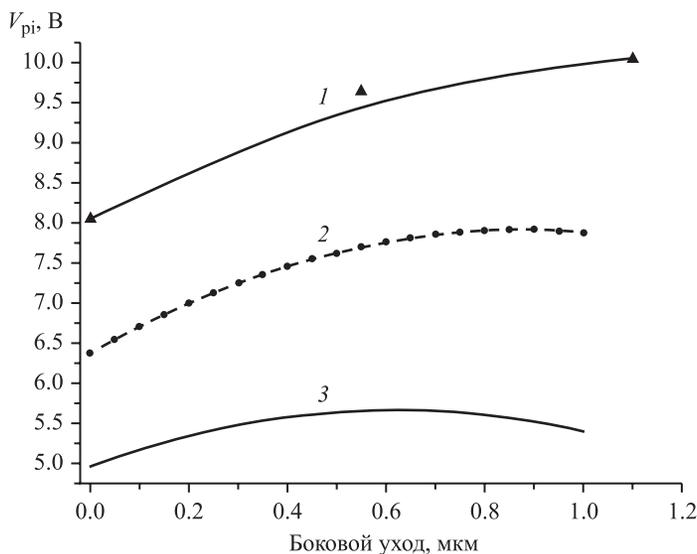


Рис. 10. Экспериментальная (1) и расчетные (2, 3) зависимости напряжения V_{ri} от величины бокового ухода (подтрава) гребенчатых элементов ВШС. Кривые 2 и 3 – исходная ширина пружинных подвесов 6.5 и 5.5 мкм соответственно

схлопывания должно увеличиваться. С другой стороны, с увеличением подтрава уменьшается константа упругости подвесов и снижается сила упругости, что должно приводить к уменьшению напряжения схлопывания. Таким образом, влияния подтрава на электростатическую и упругую силы конкурируют между собой, что и объясняет характер зависимости напряжения схлопывания от величины подтрава.

Измерение напряжения V_{ri} осуществлялось с помощью специальной электронной схемы, преобразующей переменную емкость ВШС в выходной сигнал. К одной контактной площадке был подключен вход измерительной схемы, а на другой – подавалось управляющее напряжение (рис. 11, а). Таким образом, одна гребенка ЧЭ служила для перемещения чувствительной массы относительно исходного положения, другая – для отслеживания этого перемещения по изменению емкости гребенки. Напряжение на ЧЭ подавалось от источника питания постоянного тока Agilent E3647A. Управление источником питания осуществлялось по интерфейсу GPIB с помощью программного обеспечения, написанного в среде LabView. Сигнал с измерителя разности емкостей поступал на АЦП платы National Instruments 6221 и считывался программно. В автоматическом режиме строилась зависимость разности емкостей в плечах измерителя от приложенного к ЧЭ напряжения. При этом задавался исследуемый диапазон напряжения и шаг по напряжению.

Типичный вид зависимости изменения емкости от напряжения представлен на рис. 11, б. Уменьшение напряжения после достижения напряжения V_{ri} не приводило к такой же обратной зависимости. Резкое изменение сигнала происходило только при более низком напряжении V_{po} (напряжение pull-out). Возникновение гистерезиса объясняется эффектом залипания

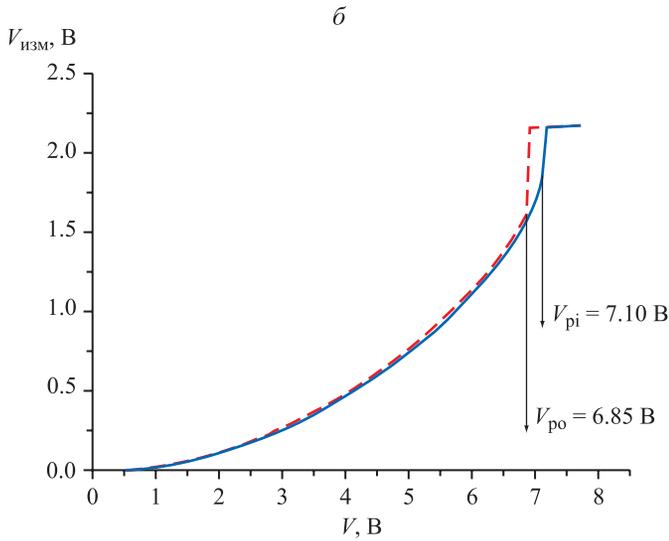
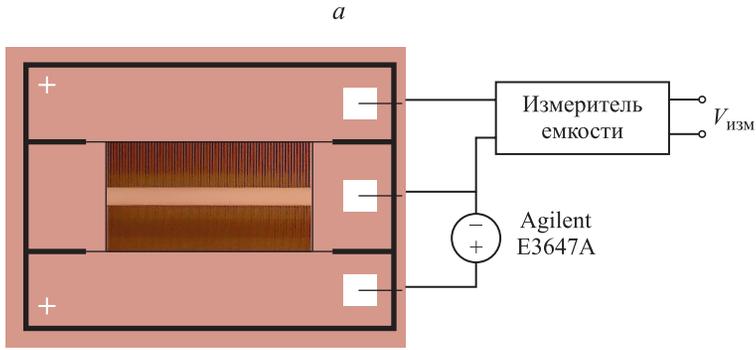


Рис. 11. Схема измерения (а) и зависимость выходного сигнала $U_{изм}$ от напряжения на обкладках одной из емкостей ВШС (б)

пружинных подвесов, а также зубцов ВШС. Залипание гребенок подтверждается наблюдением в оптическом микроскопе. В зависимости от силы залипания разница $V_{рi} - V_{ро}$ может достигать нескольких вольт. В конструкции ЧЭ были предусмотрены упоры, но они не предотвратили залипание. Стоит отметить, что наличие гистерезиса не должно влиять на характеристики ЧЭ. Многократные измерения гистерезисной кривой показали, что величина напряжения $V_{рi}$ не изменялась. Измерения $V_{рi}$ разных ЧЭ, изготовленных на одной пластине, ширина пружинных подвесов которых равнялась 5.0 мкм, показали, что $V_{рi}$ изменялось в диапазоне от 8.05 до 8.80 В. Такой широкий разброс $V_{рi}$ может быть обусловлен влиянием как технологических факторов (неравномерность травления по пластине, литографический уход и др.), так и загрязнениями. Экспериментально полученные величины $V_{рi}$ были выше их расчетных значений. Это может объясняться тем, что в расчете не учитывалось влияние емкости C_2 .

С увеличением величины бокового подтравла напряжение схлопывания увеличивалось (см. рис. 10). Уменьшение толщины гребенчатых структур достигалось путем значительного увеличения времени травления (50, 100 циклов травления) на конечной стадии. После дополнительного почти 20% перетрава боковой уход составлял 1.2 мкм. Контроль размеров осуществлялся с использованием растрового электронного микроскопа. Ширина гребенок уменьшалась только на чувствительной массе. Это объясняется тем, что температура вывешенной чувствительной массы при плазменном травлении вследствие плохого теплоотвода была значительно выше температуры приборного слоя.

Полученные данные показали, что зависимость V_{pi} от величины перетрава находилась в качественном согласии с расчетными данными. Значительное отклонение V_{pi} от номинальных значений может свидетельствовать о технологическом уходе режимов изготовления ЧЭ микроакселерометров. Можно отметить, что вид зависимости выходного сигнала от подаваемого напряжения мог изменяться, если поменять измерительные и управляющие ВШС структуры. Это свидетельствует о том, что две емкости ВШС различны, что также может служить параметром контроля изготовления ЧЭ МА.

Заключение

В работе представлена технология изготовления ЧЭ МА гребенчатого типа с высокоаспектными встречно-штыревыми структурами на пластине КНС и ЧЭ МА маятникового типа на кремниевой пластине с использованием процессов глубокого анизотропного травления. Показаны основные особенности их изготовления, связанные с эффектами травления высокоаспектных структур. Представлена методика измерения динамических характеристик ЧЭ МА с использованием оптического стенда, а также методика контроля изготовления ЧЭ по зависимости сигнала, характеризующего емкость конденсатора ВШС, от величины напряжения на обкладках связанного конденсатора и по величине напряжения электростатического схлопывания. Показано, что такие методики можно применять для экспресс-диагностики процесса изготовления ЧЭ. Результаты работы могут быть использованы при разработке технологии изготовления ЧЭ МА других конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Yazdi N., Ayazi F.A., Najafi K.* Micromachined Inertial sensors. *Proceeding of the IEEE*. 1998. Vol. 86. N8. 1640–1658.
2. *Acar C., Shkel A.M.* Experimental evaluation and comparative analysis of commercial variable-capacitance MEMS accelerometers // *J. Micromech. Microeng.* 2003. Vol. 13. P. 634–645.
3. *Yazdi N., Najafi K.* An all-silicon single-wafer micro-g accelerometer with a combined surface and bulk micromachining process // *J. Microelectromech. Systems*. 2000. Vol. 9. N4. P. 544–550.

4. Chae J., Kulah H., Najafi K. A monolithic three-axis micro-g micromachined silicon capacitive accelerometer // *Microelectromech. Systems*. 2005. Vol. 14. N2. P. 235.
5. Xiao F., Che L., Xiong B., Wang Y., Zhou X. et al. A novel capacitive accelerometer with an eight-beam-mass structure by self-stop anisotropic etching of (100) silicon // *J. Micromech. Microeng.* 2008. Vol. 18. P. 075005.
6. Lia W., Song Z., Li X., L. Che, Wang Y. A novel sandwich capacitive accelerometer with a double-sided 16-beam-mass structure // *Microelectr. Engineering*. 2014. Vol. 115. P. 32–38.
7. Amini B. V., Ayazi F. Micro-gravity capacitive silicon-on-insulator accelerometers // *J. Micromech. Microeng.* 2005. Vol. 15. P. 2113–2120.
8. Monajemii P., Ayazi F. Design optimization and implementation of a microgravity capacitive HARPSS accelerometer // *IEEE Sensors J.* 2006. Vol. 6. N1. P. 39–44.
9. Chae J., Kulah H., K. Najafi K. A CMOS-compatible high aspect ratio silicon-on-glass in-plane microaccelerometer // *J. Micromech. Microeng.* 2005. Vol. 15. P. 336–345.
10. Hsu Y.-W., Chen J.-Y., Chien H.-T., Chen S., Lin S.-T., Liao L. P. New capacitive low-g triaxial accelerometer with low cross-axis sensitivity // *J. Micromech. Microeng.* 2010. Vol. 20. P. 055019.
11. Xie J., Agarwal R., Liu Y., Tsai J. M., Ranganathan N., Singh J. Compact electrode design for an in-plane accelerometer on SOI with refilled isolation trench // *J. Micromech. Microeng.* 2011. Vol. 21. P. 095005.
12. Tay F.E.H., Xu J., Logeeswaran V.J.. A differential capacitive low-g microaccelerometer with mg resolution. // *Sensor and Actuators*. 2000. Vol. 86. P. 45–51.
13. Mol L., Rocha L. A., Cretu E., Wolffenbuttel R. F. Read-out calibration of a SOI capacitive transducer using the pull-in voltage // *J. Micromech. Microeng.* 2008. Vol. 18. P. 064009.
14. Тимошенко С.П., Симонов Б.М., Бритков О.М., Бритков С.А., Анчутин С.А. Тимошенко А.С. Балансировка кремниевых датчиков угловой скорости в процессе изготовления // *Изв. вузов. Электроника*. 2015. Т. 20. № 1. С. 58–67.
15. Морозов О.В., Амиров И.И. Аспектнонезависимое анизотропное травление кремния в плазмохимическом, циклическом процессе // *Микроэлектроника*. 2007. Т. 36. № 5. С. 380–389.
16. Docker P.T., Kinnell P., Ward M.C. A dry single-step process for the manufacture of released MEMS structures // *J. Micromech. Microeng.* 2003. Vol. 13. P. 790–794.
17. Rocha L.A., Cretu E., Wolffenbuttel R.F. Analysis and analytical modeling of static pull-in with application to MEMS-based voltage reference and process monitoring // *J. Microelectromech. Systems*. 2004. Vol. 13. P. 342–354.
18. Dias R.A., Cretu E., Wolffenbuttel R., Rocha L. Pull-in-based μg -resolution accelerometer: Characterization and noise analysis // *Sensors and Actuators A*. 2011. Vol. 172. P. 47–53.
19. Chen W., Li X., Liu X., Yin L. Study of self-calibrating MEMS accelerometers // *AIP ADVANCES*. 2015. Vol. 5. P. 041326.
20. Dong L., Pan Y., Lou J., Bao J.. Study of the influence of fringe edge on MEMS capacitive accelerometers self-calibration // *Microsyst. Technol.* 2015. Vol. 21. P. 1179–1186.
21. Уваров И.В., Морозов О.В., Аминов М.К., Изюмов М.О., Лемехов С.С., Курприянов А.Н., Козлов А.Н., Амиров И.И. Анализ изготовления чувствительного элемента микроакселерометра // *Изв. вузов. Электроника*. 2016. Т. 21. № 5. С. 448–455.
22. Уваров И.В., Морозов О.В., Козин И.А., Постников А.В., Амиров И. И., Кальнов В. А. Динамические характеристики микроакселерометра с повышенным фактором демпфирования // *Нано- и микросистемная техника*. 2011. № 12. С. 38–40.
23. Lee Y.-S., Jang Y.H., Kim Y.-K., Kim J.-M. Thermal de-isolation of silicon microstructures in a plasma etching environment // *J. Micromech. Microeng.* 2013. Vol. 23. P. 025026.

24. *Matsuura T., Chabloz M., Jiao J., Yoshida Y., Tsutsumi K.* A method to evade silicon backside damage in deep reactive ion etching for anodically bonded glass-silicon structures // *Sensors and Actuators A*. 2001. Vol. 89. P. 71–75.
25. *Cooper E. B., Post E. R., Griffith S.* et al. High-resolution micromachined interferometric accelerometer // *Appl. Phys. Lett.* 2000. Vol. 27. P. 3316–3318.
26. *Уваров И.В., Наумов В.В., Аминов М.К., Куприянов А.Н., Амиров И.И.* Исследование резонансных характеристик металлических микро- и нанобалок // *Нано- и микросистемная техника*. 2011. № 12. С. 45–48.