

Интегральный трехосевой микроакселерометр туннельного типа

М.А. Денисенко, А.С. Исаева, А.Ш. Рахматулин, В.Д. Попов

Южный федеральный университет, институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, кафедра конструирования электронных средств, г. Таганрог

Аннотация: В представленной работе приводится конструкция и технология, а также обсуждаются технологические основы изготовления трехосевого интегрального микромеханического акселерометра туннельного типа. Рассмотрены технологические особенности управляемой самоорганизации механически напряженных полупроводниковых слоев GaAs/InAs для получения структур МЭМС-сенсоров. Приведен принцип работы туннельного акселерометра. Предложенная конструкция была промоделирована и оптимизирована с использованием САПР ANSYS. Полученные результаты моделирования могут быть использованы для разработки высокотехнологичных прецизионных трехосевых МЭМС-сенсоров линейных ускорений.

Ключевые слова: микроэлектромеханическая система, МЭМС, дизайн, датчик, сенсор, акселерометр, моделирование, математическая модель.

Введение

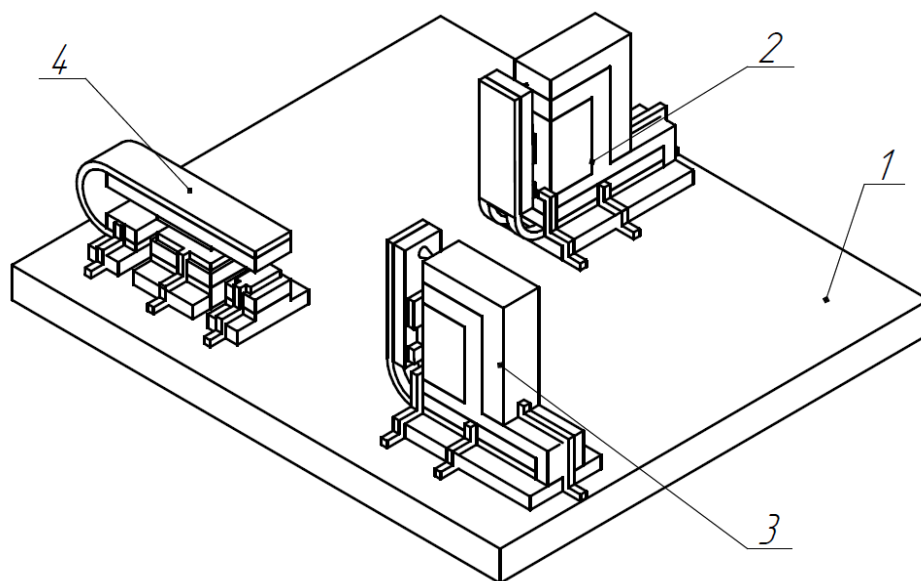
Микроэлектромеханические системы (МЭМС) в настоящее время находят широкое применение в различных сферах, таких как: производство носимой электроники, бытовых устройств, игровых консолей и игрушек, а также в транспортной, космической и военной отраслях [1,2]. Значительную долю рынка МЭМС составляют механико-электрические системы (сенсоры) или электромеханические системы (актюаторы), имеющие микро - и наноразмеры.

Такое распространение они получили за счет развития технологий, которые позволяют получать устройства малых размеров, с низким энергопотреблением и относительно невысокой ценой для конечного потребителя. Современные подходы к проектированию МЭМС и развитие технологий производства позволяют использовать микросистемы в различных средах, в широком диапазоне температур, влажности и давлений, что еще шире предопределило их использование [3,4,5]. Технология изготовления подобных систем основывается или на интеграции МЭМС и кремниевой (или другой полупроводниковой) интегральной схемы (ИС) на

подложке при помощи микросборки, или в применении подхода, когда МЭМС часть изготавливается вместе с ИС в едином технологическом цикле.

Конструкция акселерометра

Предложенная конструкция трехосевого микроакселерометра состоит из трех сенсоров, выполненных на одной подложке в едином технологическом цикле: двух вертикального типа и одного горизонтального типа (Патент RU (11) 2 660 412(13) С1 2018 г.). Сенсорные элементы, каждый из которых является одноосевым акселерометром, могут быть получены с применением одних и тех же принципов, и материалов и отличаются только в ориентации подвижной части и соответствующих контактов, что показано на рисунке 1.

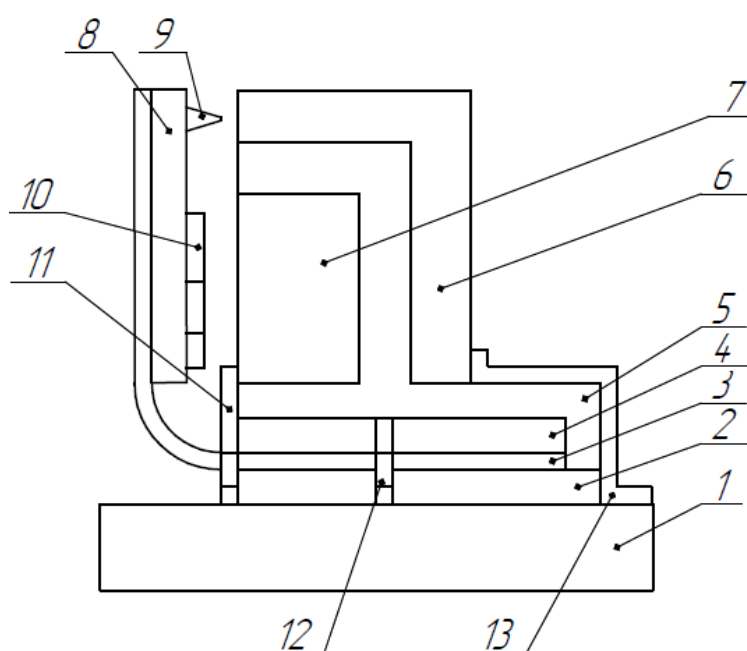


1 – подложка; 2 – сенсор, чувствительный вдоль оси Y; 3 – сенсор, чувствительный вдоль оси X; 4 – сенсор, чувствительный вдоль оси Z

Рис. 1. – Структура микромеханического акселерометра туннельного типа

Конструкция акселерометра горизонтального типа позволяет регистрировать линейное ускорение вдоль оси, перпендикулярной плоскости подложки (Z). Она подробно описана в работах [6,7].

Сенсоры вертикального типа идентичны и отличаются только ориентацией друг относительно друга под углом 90 градусов, что обеспечивает чувствительность вдоль осей, параллельных плоскости подложки (X и Y). Конструкция сенсоров приведена на рисунке 2.



1 – подложка кремния; 2 – полуизолирующая подложка; 3 – упругий
подвес; 4 – контактный слой; 5 – полуизолирующий слой; 6 – неподвижный
электрод; 7 – неподвижный электрод, входящий в состав
электростатического актюатора; 8 – инерционная масса (ИМ); 9 –
подвижный электрод; 10 – подвижный электрод, входящий в состав
электростатического актюатора; 11 – контакт к неподвижному
электростатическому актюатору; 12 – контакт к подвижному электроду;
13 – контакт к неподвижному электроду

Рис. 2. – Структура акселерометра вертикального типа

Трехосевой акселерометр образован сенсорами вертикального типа, каждый содержит туннельный контакт, образованный подвижным (на нем сформировано острие туннельного контакта, обозначение 9 на рисунке 2) и неподвижным относительно подложки (6) электродами. Зазор составляет единицы нанометров, что и обеспечивает протекание туннельного тока.

Туннельный контакт используется для высокоточной (по сравнению с традиционными емкостными и пьезоэлектрическими элементами) регистрации изменения ускорения объекта. При наличии ускорения вдоль соответствующей оси происходит отклонение ИМ (8), что изменяет расстояние между подвижным и неподвижным электродами, и, если это расстояние сокращается, приводит к появлению туннельного тока.

Технология изготовления акселерометра

Предложенная конструкция выполняется с использованием принципов Принц-технологии [8], суть которой заключается в выращивании гетероструктуры, состоящей из механически напряженных полупроводниковых слоев, например, GaAs/InAs, что проиллюстрировано на рисунке 3. При эпитаксиальном выращивании данных слоев, возникает внутреннее напряжение слоев из-за разности периодов кристаллических решеток. При освобождении от подложки (селективном травлении жертвенного слоя) межатомные силы стремятся уменьшить/увеличить расстояние между атомами, что приводит к скручиванию структуры.

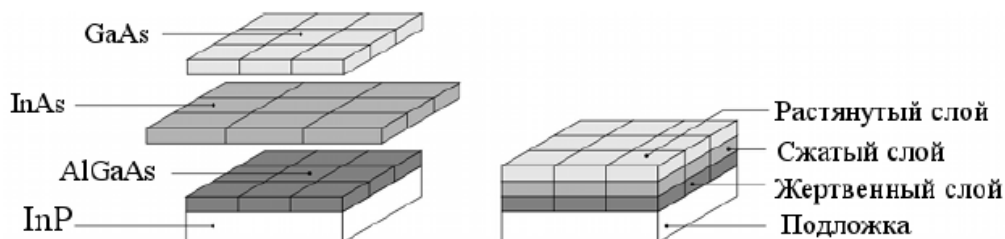


Рис. 3. – Формирование слоев методом эпитаксии, из материалов с различным шагом кристаллической решетки для создания внутренних механических напряжений [9]

Технологические операции, применяемые для получения описываемой конструкции трехосевого туннельного акселерометра, могут быть организованы таким образом, что возможно их совмещение с технологическим процессом изготовления интегральных схем на основе кремниевых технологий. Известно, что разница в шаге кристаллической решетки кремния и GaAs составляет около 4%, что препятствует расположению слоев этих материалов друг на друге непосредственно. Эта проблема может быть решена за счет применения буферных слоев – специально подобранных промежуточных полупроводниковых слоев, позволяющих осуществить плавный переход от постоянной решетки подложки кремния к постоянной решетке гетероструктурного слоя.

Все необходимые слои, формирующие структуры акселерометров, получают методом эпитаксиального выращивания в едином технологическом цикле; острое подвижного туннельного контакта формируется при помощи фокусированного ионного пучка (ФИП).

Порядок операций следующий: на подготовленной кремниевой подложке выращивается буферный слой GaP. Затем формируются слои гетероструктуры, состоящей из жертвенного слоя (AlGaAs), а также слоев InAs и GaAs, между которыми возникает внутреннее механическое напряжение, способствующее в последующих этапах самоорганизации полупроводниковых структур и окончательному формированию конструкции акселерометров. Далее выращивается контактный слой из высоколегированного эпитаксиального кремния p^{++} для снятия сигнала с гетерослоя, а в области подвижного контакта данный слой будет выполнять функцию инерционной массы. Для формирования туннельного контакта необходим зазор между формирующими его электродами порядка 1 нм, но получить такой зазор технологически в такой конструкции довольно сложно, поэтому в ней предусмотрен электростатический актюатор, с помощью

которого выполняется прецизионная установка требуемого зазора между подвижным и неподвижным контактами за счет электростатических сил. Металлический контакт актюатора выполняется из слоев материалов Ti/Pt/Au, формирующих омический контакт. На следующем этапе формируется подвижный электрод с помощью ФИП. Далее необходимо изолировать контактный слой, с которого снимается сигнал с подвижного электрода, от последующих формирующихся контактных слоев. В качестве изоляционного слоя используется диоксид кремния, выращенный при помощи фотостимулированного осаждения SiO_2 с использованием монодисилана. На следующем этапе выращивается неподвижный электрод туннельного контакта и неподвижный контакт актюатора из Ti/Pt/Au, эта композиция материалов позволяет улучшить адгезию к поверхности, так слой Pt термодинамически стабилен и не позволяет мигрировать Ti до поверхности Au. Неподвижный электрод туннельного контакта и неподвижный контакт актюатора изолируются слоем SiO_2 . На данном этапе структура сформирована и остается высвободить подвижную часть акселерометра при помощи селективного травления жертвенного слоя AlGaAs, подбирая точное время травления можно добиться скручивания структуры на определенный угол. Конструкция вертикально ориентированного туннельного микроакселерометра с указанием материалов областей приведена на рисунке 4. В данной работе приводится технология только для сенсора вертикального типа, т.к. для сенсора горизонтального типа технология будет практически идентичной.

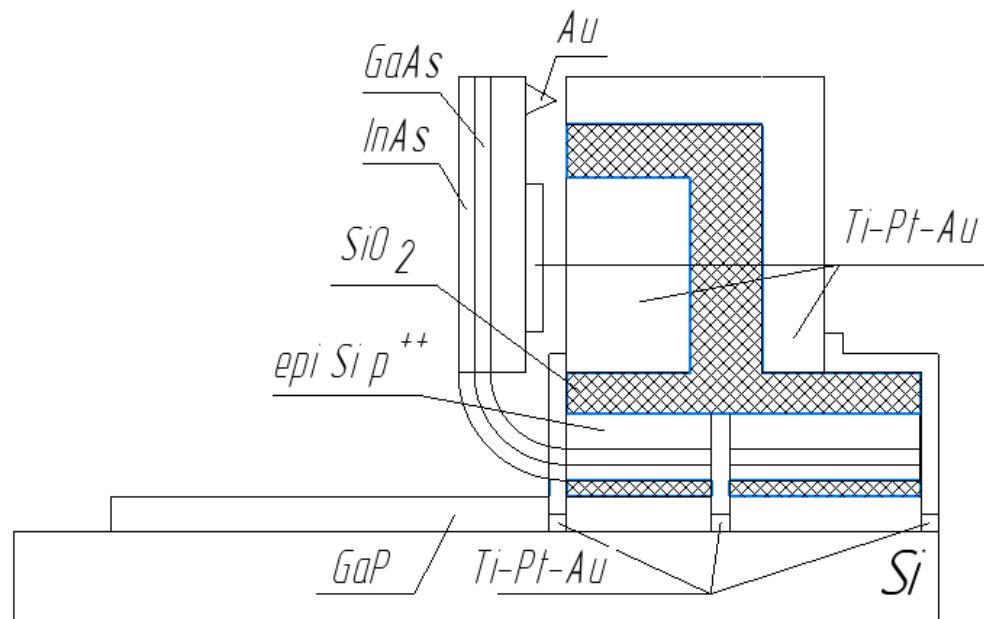


Рис.4. – Материалы областей конструкции акселерометра вертикального типа

Моделирование акселерометра

Для доказательства перспективности разработанной конструкции в CAD ANSYS 18.0 [10] была разработана ее макрос-модель, учитывающая реальные физико-геометрические параметры структуры. В данном моделировании был проведен статический анализ структуры, приведенный на рисунке 5.

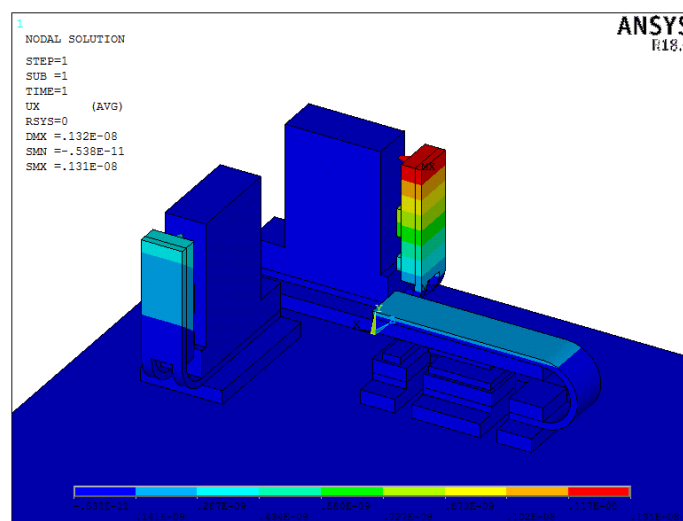


Рис. 5. – Результаты моделирования разработанной конструкции акселерометра под воздействием ускорения 8g вдоль оси OX

Численные результаты статического анализа приведены в таблице 1.

Таблица № 1

Результаты моделирования акселерометра при ускорении 8g

Направление ускорения 8g	Отклонение по оси X (м)	Отклонение по оси Y (м)	Отклонение по оси Z (м)
+	$-0.131 \cdot 10^{-8}$	$-0.190 \cdot 10^{-8}$	$-0.130 \cdot 10^{-8}$
-	$0.131 \cdot 10^{-8}$	$0.190 \cdot 10^{-8}$	$0.130 \cdot 10^{-8}$

Был проведен расчет механической чувствительности на основании полученных данных. В результате расчетов были получены следующие величины чувствительности по каждой из осей: $SensOX = 1.671 \cdot 10^{-11}$ м., $SensOY = 2.423 \cdot 10^{-11}$ м., $SensOZ = 1.658 \cdot 10^{-11}$ м. Кроме того был проведен модальный анализ для нахождения частот собственных колебаний, что позволит минимизировать или вовсе исключить вероятности вхождения всей конструкции в резонанс. Модальный анализ проводился для первых десяти мод в диапазоне от 0 до $10 \cdot 10^9$ Гц. Значения собственных частот колебаний приведены в таблице 2.

Таблица № 2

Собственные частоты колебаний

Номер частоты	Значение собственной частоты колебаний (Гц)	Номер частоты	Значение собственной частоты колебаний (Гц)
1	38759.6	6	92623.1
2	47539.5	7	175612
3	47782.7	8	362135
4	59672	9	363186
5	92341.8	10	426870

Заключение

В данной работе описан разработанный интегральный микроэлектромеханический акселерометр туннельного типа, который способен регистрировать ускорение по всем осям и с высокой точностью. Разработана физико-топологическая модель структуры в САПР ANSYS для проведения статического и модального анализа.

Работа выполнена при финансовой поддержке совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (номер проекта МК-2130.2020.8).

Литература

1. Berkeley, S. Sensor & actuator center. 2014. URL: bsac.eecs.berkeley.edu/
2. Гурков В.А., Беляев М.А., Бакшеева А.Г. Микромеханические системы: учеб.пособие. – Петрозаводск: Из-во ПетрГУ, 2016. – 171 с.
3. Гулякович Г.Н., Северцев В.Н., Шурчков И.О. Перспективы и проблемы полупроводниковой наноэлектроники // Инженерный вестник Дона, 2012, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/790
4. Fraden J. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. Fifth Edition. – Switzerland: Springer International Publishing, 2016. – 758 p.
5. Крекотень Ф.В. Современные МЭМС-гироскопы и акселерометры // Петербургский журнал электроники. 2011. №1. - С.81-96.
6. Denisenko M.A., Konoplev B.G., Isaeva A.S., Lysenko I.E. Integrated micro-mechanical tunneling accelerometer // J. Pharm. Sci. & Res. Vol. 9(11), 2017, pp. 2155-2158. ISSN: 0975-1459.
7. Денисенко М.А., Исаева А.С. Интегральный микромеханический туннельный акселерометр на основе управляемой самоорганизации

механически напряженных полупроводниковых слоев. Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. № 2(196). С. 25 – 33.

8. Prinz V.Ya. Precise semiconductor nanotubes and nanoshells fabricated on (110) and (111) Si and GaAs // Physica E. –2004. –V.23. – Pp.260-268.

9. Рындин Е.А., Приступчик Н.К. «Интегральный микромеханический туннельный акселерометр на основе напряженных слоев GaAs/InAs», Известия ЮФУ. Технические науки 01, 2009 с. 129 - 134.

10. Ломакин М.А. Особенности построения модели погрешности МЭМС-датчиков при решении навигационной задачи // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2398

References

1. Berkeley, S. Sensor & actuator center. 2014. URL: bsac.eecs.berkeley.edu/

2. Gurkov V.A., Beljaev M.A., Baksheeva A.G. Mikromekhanicheskie sistemy [Micromechanical systems]. Ucheb.posobie. Petrozavodsk: Iz-vo PetrGU, 2016. 171 p.

3. Guljakovich G.N., Severcev V.N., Shurchkov I.O. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/790

4. Fraden J. Handbook of Modern Sensors. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. 758 p.

5. Krekoten' F.V. Peterburgskij zhurnal jelektroniki. 2011, №1. Pp. 81-96.

6. Denisenko M.A., Konoplev B.G., Isaeva A.S., Lysenko I.E. J. Pharm. Sci. & Res. Vol. 9(11), 2017, P. 2155-2158. ISSN: 0975. 1459.

7. Denisenko M.A., Isaeva A.S. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. 2018. № 2(196). P. 25.

8. Prinz V.Ya. Physica E. 2004. V.23. pp.260-268.

9. Ryndin E.A., Pristupchik N.K. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki 01, 2009 pp. 129- 134.



10. Lomakin M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2398