

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Амирова Ильдара Искандеровича на диссертацию Малохатко Софьи Владимировны «Исследование и разработка матричных пьезоэлектрических микроэлектромеханических ультразвуковых сенсоров», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств

Актуальность темы диссертации

Разработка и изготовление носимых ультразвуковых пьезоэлектрических сенсоров для непрерывного контроля физиологического состояния человека является интенсивно развивающейся областью биомедицинской сенсорики. Многие области применения ультразвука для зондирования, получения изображений требуют миниатюрных преобразователей малой мощности и матриц преобразователей, интегрированных с электронными системами. Их изготовление на основе микротехнологии позволяет создавать малогабаритные сенсорные устройства с более высокими характеристиками. Изготовление матричных пьезоэлектрических микроэлектромеханических ультразвуковых сенсоров (матричные МЭМС УЗ сенсоры) - это сравнительно новое направление в области разработки микросенсорных устройств. Их создание позволяет расширить возможности и области применения УЗ сенсоров. Матричные МЭМС УЗ сенсоры в виде набора микромембран изготавливаются на кремниевых подложках с использованием объемной технологии микросистемной техники. В настоящее время с целью повышения их характеристик разрабатываются новые конструкции и технологии их создания. Поэтому диссертационная работа Малохотко С.В., направленная на разработку новых матричных пьезоэлектрических микроэлектромеханических ультразвуковых сенсоров с широким диапазоном резонансных частот является, несомненно, актуальной.

Для решения поставленной цели в работе были проведены теоретические и экспериментальные исследования технологии изготовления матричных пьезоэлектрических микроэлектромеханических преобразователей на основе балочных подвесов. Предлагаемая разработка позволит расширить рабочий

диапазон ультразвукового приемника/передатчика без существенной потери чувствительности их.

Содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения, в котором приведены документы о внедрении и использовании результатов работы. Объем диссертации составляет 154 страницы с 104 рисунками и 24 таблицами. Список используемых источников состоит из 100 наименований.

Во введении показана актуальность диссертационной работы, приведена цель, задачи работы, а также научная новизна, практическая значимость представленной диссертации. Приведены положения, выносимые на защиту и реализация результатов работы:

В первой главе диссертации на основе приведенного литературного обзора дан анализ современного состояния технологии микроэлектромеханических ультразвуковых сенсоров их конструкций в виде однослойных и многослойных мембран, а также матрицы МЭМС УЗ сенсоров. На основе проведенного анализа были сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе были приведена методика проектирования матричных пьезоэлектрических МЭМС УЗ сенсоров. Методика начинается с расчетов методом конечных элементов резонансной частоты многослойной кремниевой мембраны. На основе заданных параметров резонансной частоты были разработаны и рассчитаны чувствительные характеристики мембран с подвесами, проведен теоретический расчет характеристик мембран в режиме излучения, проведены исследования влияния внутренних напряжений в слоях мембраны на их чувствительность. Результаты расчетов резонансных частот девяти типов мембранных структур с тремя типами пьезоэлектриков (ПЭ) показали, что в широком диапазоне толщин слоев кремния и пьезоэлектриков величины резонансных частот зависят только от геометрических размеров мембран и слабо зависят от материала ПЭ, хотя их модули Юнга отличались более чем в три раза. Было показано, что отношение резонансных частот мембран с пьезоэлектриками и без него практически не зависит от отношения толщины кремния и ПЭ при изменении толщины Si от 2 до 50 мкм. В работе была приведена показательная

такая логарифмическая зависимость с введением критерия D. Эти расчеты позволили определиться с размерами толщинами пленок кремния, ПЭ, металлов, геометрическими размерами мембран, резонансные частоты которых лежат в требуемом, заданном диапазоне частот от 1 до 3 МГц и перейти к моделированию характеристик матриц квадратных кремниевых мембран трёх типов. Два типа мембран – это мембраны на разных упругих подвесах. Их использование приводит к увеличению чувствительности сенсора и изменению резонансной частоты. В работе для управления резонансными частотами была использована ее зависимость от ширины, длины и количества подвесов мембраны. Наиболее интересными являются расчеты механических и электрических коэффициентов чувствительности мембранного сенсора от размеров и количества подвесов. Расчеты проводились с ZnO в качестве ПЭ слоя. Было показано, что электрическая чувствительность мембран с двумя типами подвесов были близкими по величине. Они были в два раза выше, чем жёсткозакреплённой мембраны при четырех подвесах. Более детальное исследование сравнение зависимостей резонансной частоты и чувствительности от ширины и количества подвесов двух типов показало, что резонансная частота с увеличением ширины и количества подвесов увеличивается, чувствительность преобразователя уменьшается почти в два раза.

На основе анализа полученных данных для дальнейшей разработки уже матричных пьезоэлектрических МЭМС УЗ сенсоров были выбраны оптимальные размеры подвесов их длина и ширина, когда резонансная частота и чувствительность достигают требуемых величин. Дальнейшая разработка была посвящена теоретическому исследованию мембран в режиме излучения в водной среде. Таким образом, было показано, что разработанная конструкция мембран может выполнять функции, как приёмника, так и излучателя звуковой волны. Далее логически был осуществлен переход к расчетам характеристик матричных пьезоэлектрических МЭМС УЗ сенсоров. Основной вывод, который был сделан на основе проведенных теоретических исследований заключается в том, что был предложен способ проектирования мембранных матричных пьезоэлектрических МЭМС УЗ сенсоров, в том числе многочастотных сенсоров.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований влияния условий нанесения и травления материалов мембранной структуры на ее

функциональные характеристики. Отмечается, что технология изготовления многослойных мембран включает методы объёмной микрообработки. Подробно были рассмотрены ключевые процессы технологии изготовления мембран – это процесс селективного, глубокого, анизотропного жидкостного травления (АЖТ) кремния, процессы магнетронного нанесения пленок не напряженных металла (Mo) и пьезоэлектрика (ZnO). Были определены характеристики АЖТ с использованием пленок оксида кремния полученных различным способом. Для АЖТ травления кремния на глубину 270 мкм необходима комбинированная пленка термического SiO_2 и плазмохимического термически стабилизированного SiO_x толщиной 1.6-2 мкм, в зависимости от того какой толщины слой SiO_2 должен остаться на поверхности.

Уменьшение внутренних напряжений в пленках металла и пьезоэлектрика является основным требованием к технологии их формирования. Экспериментальные исследования показали, что термический отжиг пленок, полученных методом магнетронного нанесения, приводит к снижению механических напряжений. Были определены условия проведения таких процессов.

В четвертой главе был представлен унифицированный технологический маршрут изготовления матричных МЭМС УЗ сенсоров. Для их изготовления необходимо проведение пяти фотолитографических операций. Было показано, что измеренные резонансные характеристики изготовленного макетного образца МЭМС-сенсора с волоконно-оптического акустического приёмника находятся в хорошем согласии с результатами моделирования.

В заключении подводятся итоги научной работы и формулируются основные результаты. Все выводы, представленные в диссертации, обоснованы.

Научная новизна и достоверность результатов

1. Была разработана методика проектирования матричных пьезоэлектрических МЭМС УЗ сенсоров включающая поэтапный расчет влияния физических параметров материалов, структуры многослойных мембран и подвесов мембранных структур.
2. Теоретически было показано, что резонансные частоты девяти типов мембранных структур с тремя типами пьезоэлектриков (ПЭ) в широком диапазоне толщин слоев кремния и пьезоэлектриков зависят только от геометрических

размеров мембран и слабо зависят от материала ПЭ, хотя их модули Юнга отличались более чем в три раза.

3. Было показано, что отношение резонансных частот кремниевых мембран со слоем пьезоэлектрика и без него практически не зависит от отношения толщины Si и ПЭ при изменении толщины Si от 2 до 50 мкм. Была приведена показательная такая логарифмическая зависимость с введением критерия D.

Достоверность полученных теоретических и экспериментальных данных подтверждается использованием широко используемого метода расчетов характеристик сенсоров, применением современных методов их измерения, а также подтверждением хорошего согласия теоретических расчетов и экспериментальных результатов измерения характеристик, изготовленного макета УЗ сенсора. По материалам диссертации опубликовано 8 статей, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 4 – в периодических журналах индексируемых Web of Science и Scopus. Результаты исследований докладывались на 8 международных и российских конференциях.

Практическая значимость работы представляется высокой. В первую очередь она заключается разработанной методике проектирования изготовления матричных МЭМС УЗ сенсоров. Она может быть применима для разработки других конструкций МЭМС сенсоров. Практическую значимость представляют результаты исследования механических напряжений функциональных слоев металлов и пьезоэлектрика в результате термического отжига, а также предложенный унифицированный технологический маршрут изготовления матричных МЭМС УЗ сенсоров.

Общая оценка диссертации

Диссертационная работа хорошо структурирована и ясно написана. В каждой главе приведены выводы. Можно отметить, что общее количество выводов в главах намного превышает пунктов научной новизны и положений, выносимых на защиту. Это свидетельствует о большой содержательности работы. Исследование выполнено на высоком научном уровне. В диссертации развит комплексный подход к разработке технологии проектирования и изготовления матричных МЭМС УЗ сенсоров, заключающийся в использовании теоретических расчетных методов определения их характеристик и экспериментальных методов

исследования. Такой подход обеспечивает высокую достоверность полученных результатов. Результаты работы, изложенные в автореферате, полностью соответствуют содержанию диссертации. В нем приведены основные результаты, научные положения, вклад автора в работе. Важно, что по материалам диссертационной работы был получен патент. Методика исследования была внедрена в образовательный процесс. Достоинством работы является, что изготовленные по предложенной технологии макетные образцы были использованы в работе НИР сторонней организации ИАПУ ДВО РАН с положительным результатом.

Замечания

1. Описание расчетов резонансных характеристик мноослойных мембран методом конечных элементов приведено очень кратко. Не написано, как проводились собственно расчеты. Следовало бы указать сетку, используемую при моделировании, размеры элементов, форму ячейки, её размер, степень полиномов, которыми производится аппроксимация. Их выбор может влиять на результат моделирования. Такое же замечание можно сделать, когда были приведены расчеты чувствительности мембран на подвесах и в случае напряженных слоев.
2. В таблице 4.5 приведено, что теоретическая чувствительность разработанного многочастотного матричного пьезоэлектрического МЭМС составляет $830 \div 540$ нм/В при изменении резонансной частоты от $0,52 \div 1,7$ МГц, хотя ранее было показано, что с увеличением резонансной частоты чувствительность уменьшается в несколько раз. Не написано, как это удалось добиться.
3. В маршруте изготовления матрицы мембран (таблица 4.4) были пропущены три фотолитографических процесса. Как было показано, для ее изготовления необходимо 5 шаблонов.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования.

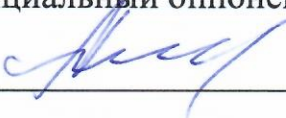
Заключение

Диссертация Малохатко С.В. является законченной научно-квалификационной работой. Она соответствует паспорту специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств», а также

требованиям п.9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013. Автор диссертации Малохатко С.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств

Я согласен на обработку моих персональных данных

Официальный оппонент:



Амиров Ильдар Искандерович

доктор физико-математических наук (специальность 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах), г.н.с., зав. лабораторией технологии микро- и наносистемной техники Ярославского Филиала федерального государственного бюджетного учреждения науки физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН.

Адрес места работы: 150007, г. Ярославль, ул. Университетская, д.21, ЯФ

ФТИАН им. К.А.Валиева РАН.

E-mail: ildamirov@yandex.ru.

Телефон: (4852) 246552,

Зав. лабораторией, г.н.с. И.И.Амирова удостоверяю.

Руководитель отдела кадров ИИИ Т.В. Фурменкова

