

Егоров Федор Андреевич

канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник

Фрязинский филиал

ФГБУН «Институт радиотехники

и электроники им. В.А. Котельникова РАН»

г. Фрязино, Московская область

Амеличев Владимир Викторович

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

ООО «НПП «Технология»

г. Москва

Генералов Сергей Сергеевич

старший научный сотрудник

ООО «НПП «Технология»

г. Москва

DOI 10.21661/r-115756

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

***Аннотация:** данная работа посвящена разработке микромеханического чувствительного элемента для волоконно-оптического преобразователя гидроакустического сигнала (ВОПГАС). Разработанный экспериментальный чувствительный элемент ВОПГАС представляет собой кремниевый кристалл с тонкой восьмигранной диэлектрической мембраной, закрепленной на кремниевой рамке. В центральной области гофрированной мембраны сформирован отражающий свет элемент на основе комбинации слоев Ni и NiCr общей толщиной 0,5 мкм. Среднее значение механической чувствительности экспериментального чувствительного элемента ВОПГАС в условиях водной среды составило 114 нм/Па, в диапазоне частот от 100 Гц до 6 кГц, при этом среднее значение резонансной частоты составило 9,1 кГц.*

Ключевые слова: гидроакустическое давление, волоконно-оптический преобразователь, диэлектрическая мембрана, интерферометр Фабри-Перо, микромеханический чувствительный элемент.

Использование волоконно-оптической технологии передачи сигнала для контроля акустического давления впервые были предложены во второй половине XX века. За этот период было разработано большое количество различных волоконно-оптических приборов, в том числе, интерферометрического типа. Одним из наиболее эффективных приборов контроля сверх малого перемещения поверхности с отражающим покрытием является интерферометр Фабри-Перо. В настоящее время технологии микромеханики и волоконной оптики позволяют создавать волоконно-оптические датчики и преобразователи с уникальными характеристиками, которые могут применяться, в частности, в качестве миниатюрных пассивных гидрофонов [1].

Основным элементом таких датчиков и преобразователей является чувствительный элемент мембранного типа, позволяющий регистрировать колебания акустического сигнала, как в воздушной, так и в водной среде. Современные технологии микропрофилирования кремния позволяют изготавливать тонкие мембраны, с гофрами и отражающей областью в центральной части. Для достижения высокой механической чувствительности мембрана должна быть тонкой (не более 1 мкм) и изготовлена из материалов с минимальными механическими напряжениями [2].

Принцип работы волоконно-оптических датчиков и преобразователей акустического давления основан на регистрации вынужденных колебаний модулятора – тонкой мембраны, возбуждаемой звуковыми волнами в газообразной или жидкой среде. С помощью высокочувствительного волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо осуществляется регистрация микроперемещений поверхности модулятора относительно торца волоконного световода.

Регистрация гидроакустических сигналов в широком диапазоне абсолютных давлений (вплоть до 10^3 атм.) может быть обеспечена за счет стабилизации давлений воды внутри и снаружи мембраны с помощью системы специальных

отверстий в корпусе [2]. Разработанная конструкция чувствительного элемента ВОПГАС обладает акустическим сопротивлением, достаточным для изоляции внутренней полости преобразователя от переменной составляющей давления в интересующем диапазоне звуковых частот [3].

Изготовление чувствительного элемента ВОПГАС основывается на традиционной полупроводниковой технологии изготовления интегральных схем с использованием технологических процессов объемной обработки кремния и получения тонких диэлектрических мембран, обладающих низким уровнем механических напряжений [4].

Цикл изготовления состоит из 4 фотолитографических циклов, технологических процессов травления кремния, его окисления и напыления металлических пленок. Основные этапы изготовления чувствительного элемента ВОПГАС приведены на рис. 1. На первом этапе в кремниевой подложке с обратной стороны путем жидкостного анизотропного травления (АЖХТ) в растворе КОН (33%) формируется кремниевая мембрана (рис. 2). Далее с помощью процессов АЖХТ и анизотропного плазмохимического травления (АПХТ) с лицевой стороны формируются микроэлементы гофрированной мембраны (рис. 3). Конструкция гофрированной мембраны позволяет существенно снизить уровень остаточных напряжений в центральной области мембраны за счет изгибной деформации в области гофра, при этом значительно возрастает и чувствительность мембраны. Затем на лицевой стороне проводится формирование мембраны на основе SiO_2 и Si_3N_4 , поверх которых напыляется отражающий элемент в центральной области из комбинации слоев $\text{NiCr}+\text{Ni}$. На завершающем этапе изготовления проводится АЖХТ кремниевой мембраны до диэлектриков с обратной стороны пластины (рис. 4).

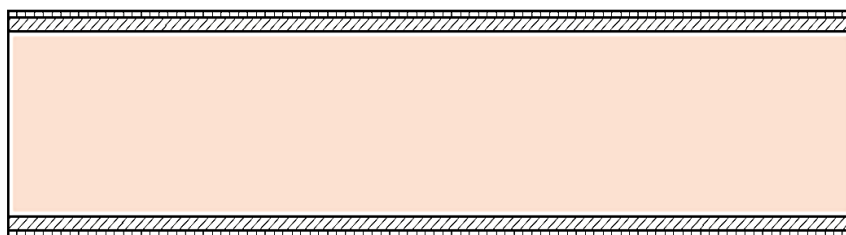
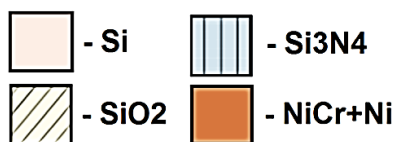


Рис. 1. Основной этап изготовления чувствительного элемента
ВОПГАС: исходная кремниевая подложка

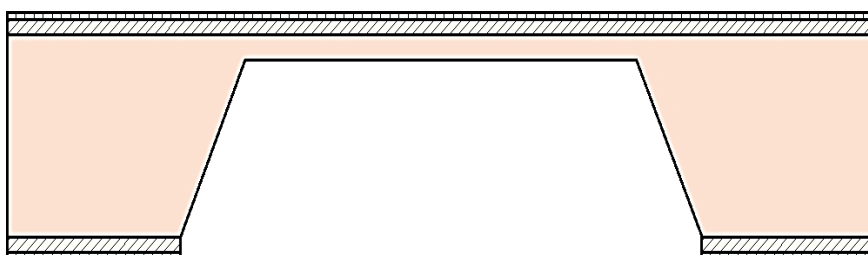


Рис. 2. Основной этап изготовления чувствительного элемента
ВОПГАС: травление мембраны с обратной стороны

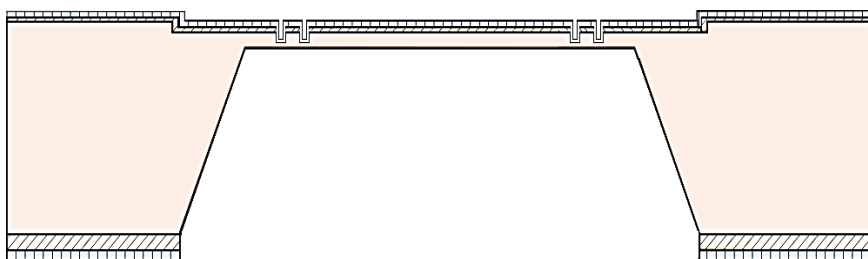


Рис. 3. Основной этап изготовления чувствительного элемента
ВОПГАС: формирование микроэлементов на лицевой стороне

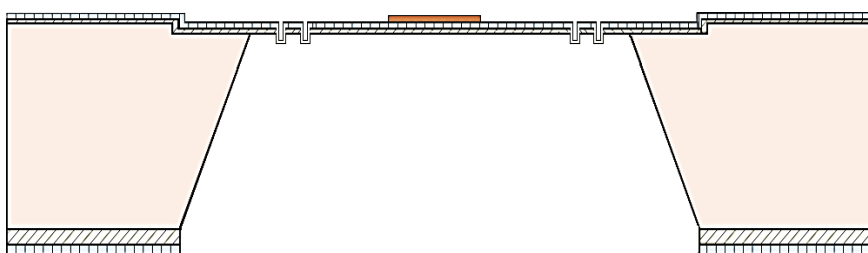


Рис. 4. Основной этап изготовления чувствительного элемента
ВОПГАС: напыление отражающего элемента.

Основными параметрами экспериментального чувствительного элемента ВОПГАС является механическая чувствительность (нм/Па) к акустическому давлению (1 Па) и амплитудно-частотная характеристика, показывающая выходной уровень чувствительности во всем диапазоне рабочих частот.

Для проведения измерений амплитудно-частотной характеристики и механической чувствительности экспериментальных образцов чувствительного элемента ВОПГАС использовался специализированный стенд, схема и фотография которого представлены на рис. 5.

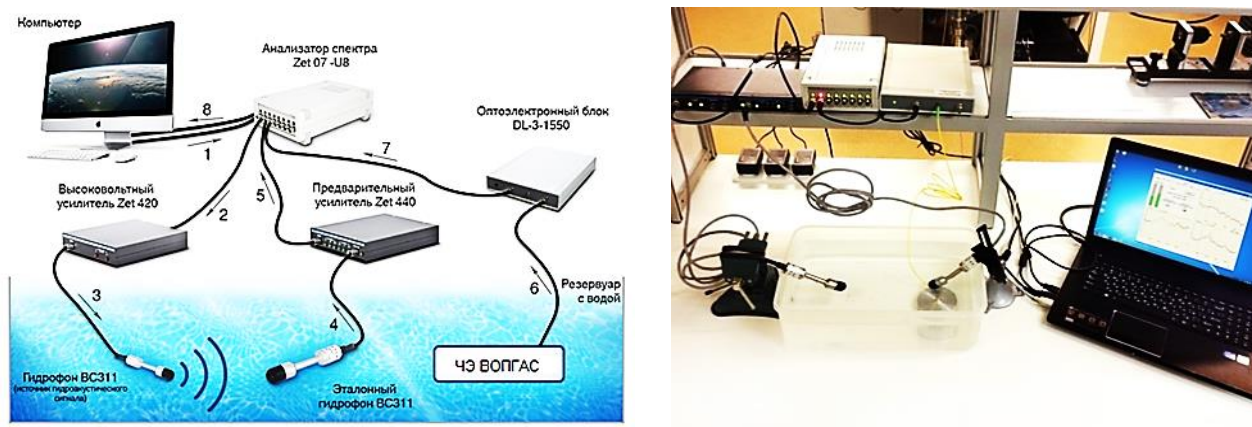


Рис. 5. Блок схема стенда и его фотография для проведения измерений экспериментальных образцов ВОПГАС

Измерение чувствительности проводилось в диапазоне частот линейного участка АЧХ при уровне акустического давления 1 Па. На рис. 6 представлена АЧХ экспериментального образца чувствительного элемента ВОПГАС. Результаты измерений показали, что среднее значение механической чувствительности исследуемых образцов составила 114 нм/Па а значения резонансных частот 9,1 кГц.

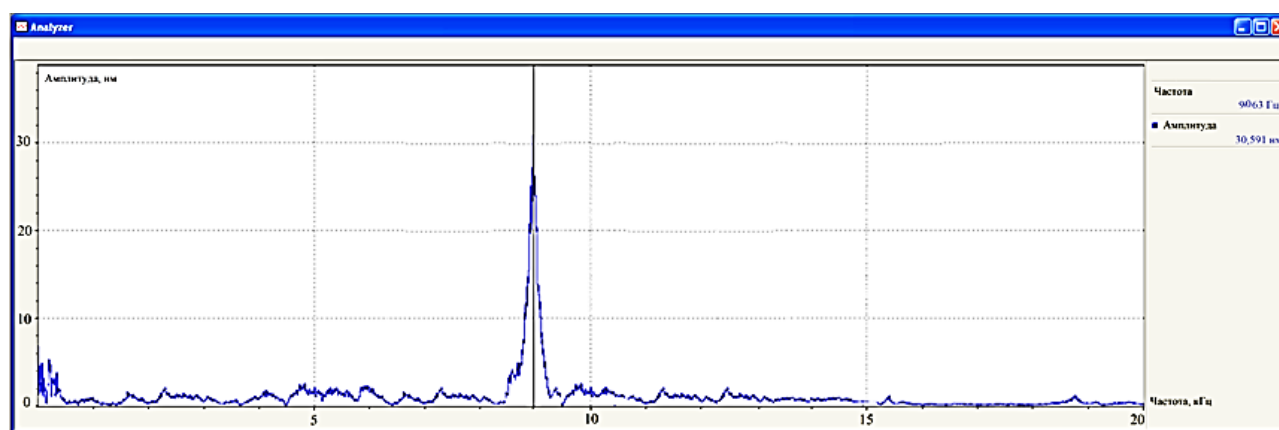


Рис. 6. АЧХ экспериментального образца чувствительного элемента ВОПГАС

Разработанная технология изготовления чувствительного элемента ВОПГАС основывается на традиционной полупроводниковой технологии изготовления интегральных схем с использованием технологических процессов объемной обработки кремния и получения тонких диэлектрических мембран, обладающих низким уровнем механических напряжений. Разработанная конструкция чувствительного элемента ВОПГАС может быть использована на глубинах до 100 м для регистрации гидроакустических сигналов. Результаты измерений показали, что среднее значение механической чувствительности исследуемых образцов чувствительного элемента ВОПГАС составляет 114 нм/Па, а среднее значения резонансной частоты – 9,1 кГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения №14.579.21.0078 о предоставлении субсидий. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57914X0078.

Список литературы

1. Kilic O. J.Acoust. Soc. Am. / O. Kilic, M.J.F. Digonnet, G.S. Kino, O. Solgaard. – 2011. – №129 (4). – P. 1837–1850.
2. Yegorov F.A. International Journal of Applied Engineering Research / F.A. Yegorov, V.V. Amelichev, S.S. Generalov, S.V. Nikiforov, S.V. Shamanayev, Ya.V. Goldberg. – Volume 10. – №21 (2015). – P. 42750–42752.

3. Амеличев В.В. Конструктивно-технологический базис создания электро-акустических преобразователей / В.В. Амеличев, А.В. Ильков. – М.: Техносфера, 2012. – С. 88.

4. Amelichev V.V. // International Journal of Applied Engineering Research, V.V. Amelichev, S.S. Generalov, S.V. Nikiforov, G.P. Solovyova, M.I. Smekhova, V.V. Platonov. – Volume 10. – №21 (2015). – P. 42767–42769.