

**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 мембранны 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 мембранныго типа, позволяющий регистрировать колебания акустического сигнала, как в воздушной, так и в водной среде. Современные технологии микропрофилирования кремния позволяют изготавливать тонкие мембранны, 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 мембранны, 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 мембранны 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 KOH (33%) формируется кремниевая мембрана (рис. 2). Далее с помощью процессов АЖХТ и анизотропного плазмохимического травления (АПХТ) с лицевой стороны формируются микроэлементы гофрированной мембранны (рис. 3). Конструкция гофрированной мембранны позволяет существенно снизить уровень остаточных напряжений в центральной области мембранны за счет изгибной деформации в области гофра, при этом значительно возрастает и чувствительность мембранны. Затем на лицевой стороне проводится формирование мембранны на основе  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , поверх которых напыляется отражающий элемент в центральной области из комбинации слоев NiCr+Ni. На завершающем этапе изготовления проводится АЖХТ кремниевой мембранны до диэлектриков с обратной стороны пластины (рис. 4).

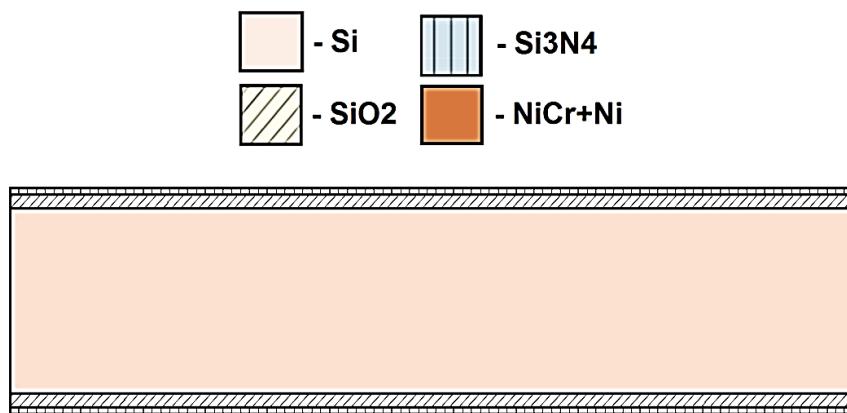


Рис. 1. Основной этап изготовления чувствительного элемента  
ВОПГАС: исходная кремниевая подложка

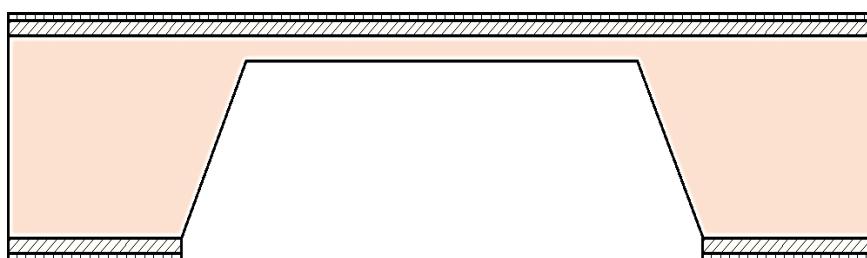


Рис. 2. Основной этап изготовления чувствительного элемента  
ВОПГАС: травление мембраны с обратной стороны

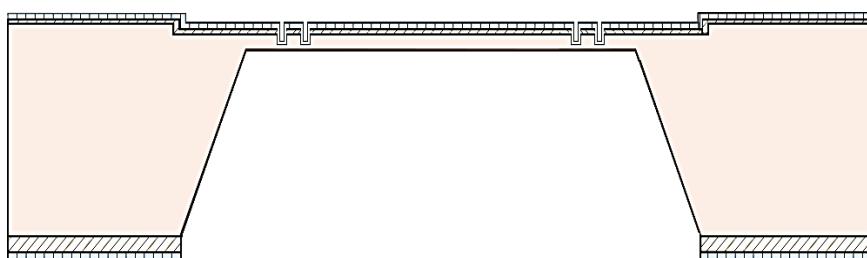


Рис. 3. Основной этап изготовления чувствительного элемента  
ВОПГАС: формирование микроэлементов на лицевой стороне

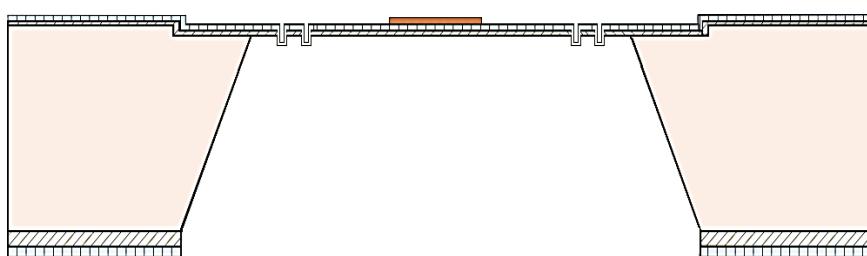


Рис. 4. Основной этап изготовления чувствительного элемента  
ВОПГАС: напыление отражающего элемента.

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.

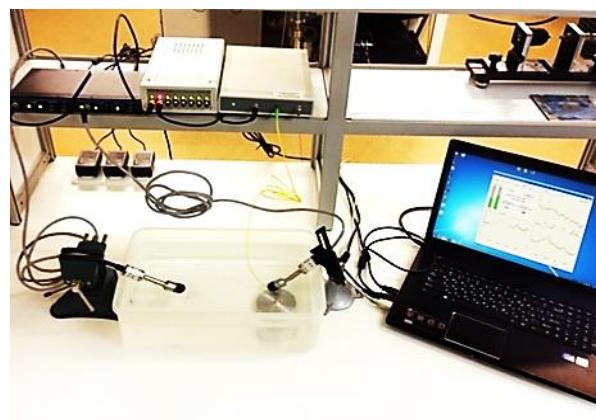
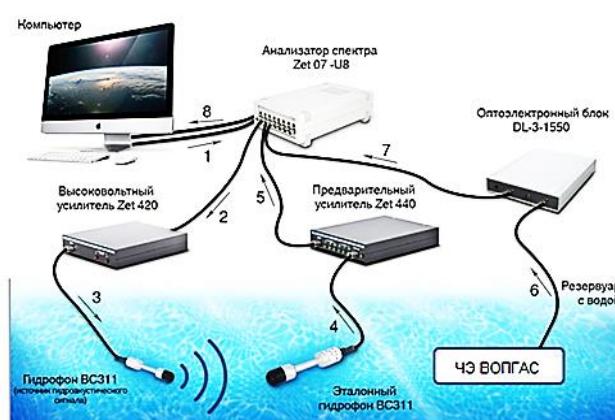


Рис. 5. Блок схема стенда и его фотография для проведения измерений экспериментальных образцов ВОПГАС

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.

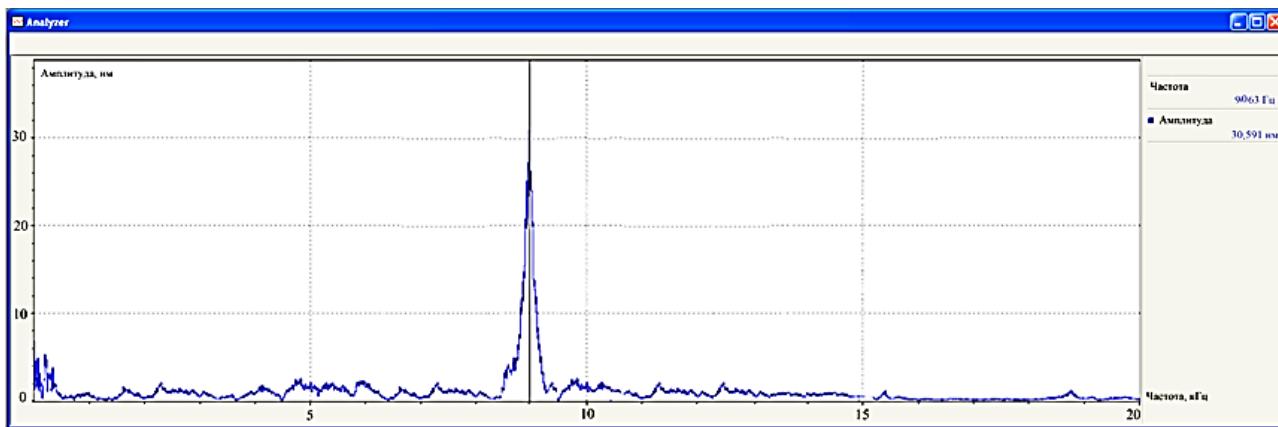


Рис. 6. АЧХ экспериментального образца чувствительного элемента ВОПГАС

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 электроакустических 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.