

Раздел II. Электроника, нанотехнологии и приборостроение

УДК 681.586

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-111-119

С.П. Малюков, В.Д. Мишнев

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СПАЯ САПФИР – СТЕКЛОВИДНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК – КЕРАМИКА

Высокие требования, предъявляемые к тензометрическим преобразователям давления, а именно: надёжность, качество, точность измерения, возможность работы в экстремальных условиях и устойчивость к агрессивной среде, создают сегодня ряд проблем, решение которых является объектом исследования данной статьи. Основными проблемами при достижении целевых показателей являются: высокая стоимость исходных изделий, трудоёмкость технологического процесса в серийном производстве, а также ограничения, влияющие на точность и надёжность показателей исходных устройств, в зависимости от условий эксплуатации. Для решения данных проблем и улучшения физико-механических показателей чувствительных элементов датчиков давления в статье рассмотрены следующие задачи: разработка конструкции тензочувствительного элемента на основе структуры «кремний на сапфире» (КНС), исследование способа его соединения с керамическим корпусным элементом и отработка технологического маршрута изготовления структуры спая сапфир – стекловидный диэлектрик – керамика. Датчик давления, выполненный на основе структуры КНС обладает высокой чувствительностью, стабильностью, практически не имеет механического гистерезиса и может работать в широком диапазоне температур от -60 до $+350^{\circ}\text{C}$ при воздействии радиации. В свою очередь, использование керамического основания позволяет уменьшить температурную погрешность датчика ввиду лучшего согласования коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) керамики ($85-100 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$) и сапфировой подложки ($60-75 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$), а также уменьшить стоимость технологического процесса из-за использования керамики вместо дорогостоящих титановых сплавов и сложной металлообработки. Таким образом, структура «сапфир – стекловидный диэлектрик – керамика» показывает возможность повышения чувствительности датчика и снижения погрешности при расширении его функциональных возможностей, упрощении конструкции и повышении технологичности изготовления.

Датчик давления; тензочувствительный элемент; кремний на сапфире; спаивание; керамика.

S.P. Malyukov, V.D. Mishnev

MANUFACTURING TECHNOLOGY OF PRESSURE SENSOR'S SENSITIVE ELEMENTS BASED ON "SAPPHIRE – VITEROUS DIELECTRIC – CERAMIC" JUNCTION

Today pressure transmitters have high requirements such as reliability, quality, measurement accuracy, the ability to work in extreme conditions and resistance to aggressive environments. The main problems in achieving these target indicators are: the high cost of the original products, the laboriousness of the technological process in serial production, and the limitations that affect the accuracy of the indicators of the original devices. Solving these problems is the subject of this article. To solve these problems and improve the physical and mechanical properties of pressure sensor's sensitive elements, the following tasks are considered in the article: development of a pressure-sensing element design based on the silicon-on-sapphire (SOS) structure,

research on the method of its connection with a ceramic body element and development of a technological route for manufacturing the structure based on "sapphire – vitreous dielectric – ceramic" junction. As a result, the pressure sensor based on the SOS structure has high sensitivity, stability, practically no mechanical hysteresis, and can operate in a wide temperature range from -60 to +350°C when exposed to radiation. In turn, the use of a ceramic base makes it possible to reduce the temperature error of the sensor due to better matching of the coefficient of linear thermal expansion (CLTE) of ceramic ($85-100 \times 10^{-7} K^{-1}$) and sapphire substrate ($60-75 \times 10^{-7} K^{-1}$), as well as reduce the cost of the technological process due to the use of ceramics instead of expensive titanium alloys and complex metalworking. Thus, the structure "sapphire – vitreous dielectric – ceramic" shows the possibility of increasing the sensitivity of the sensor and reducing the error while expanding its functionality, simplifying the design and improving manufacturability.

Pressure sensor; pressure-sensing element; silicon on sapphire; thermal soldering; ceramics.

Введение. Необходимость точного измерения давления жидкостей и газов в различных условиях представляет сложную и наукоёмкую задачу. На сегодняшний день одними из основных направлений научных исследований в области развития полупроводникового приборостроения тонкоплёночных тензорезисторных датчиков давления (ТТДД) можно выделить: оптимизацию технологического процесса производства полупроводниковых ТТДД; исследование напряжённо-деформированного состояния упругих элементов ТТДД; поиск новых методов уменьшения погрешности измерений [1].

Исследования различных типов структур тензочувствительных элементов (ТЧЭ) датчиков давления [1–8] показывают, что одним из наиболее перспективных материалов подложек в процессе формирования чувствительной мембраны является сапфир. Датчики давления, структурой ТЧЭ которых является кремний на сапфире (КНС), обладают рядом уникальных преимуществ: высокая температура эксплуатации, до 300–350°C; быстроедействие приборов, обусловленное отсутствием токов утечки через подложку; стойкость к агрессивным средам и радиации.

1. Задачи исследования. Для реализации тензочувствительных элементов (ТЧЭ) датчика давления на основе структуры «кремний на сапфире» (КНС) одними из основных задач являются: создание качественной кремниевой мостовой схемы (формирование тензорезисторов) на подложке из сапфира, формирование точной чувствительной мембраны из сапфировой подложки и проработка соединения ТЧЭ с корпусным изделием.

2. Основные этапы и подготовка к исследованию. Изготовление полупроводникового тонкоплёночного тензорезисторного датчика давления (ТТДД) осуществляется следующим способом. Полупроводниковый чувствительный элемент выполняется на основе структуры «кремний на сапфире» (КНС). Пластины сапфира с ориентацией $(1\bar{1}02)$, служащие подложками для изготовления чувствительного элемента, перед осаждением слоев кремния отжигаются при температуре 1400°C в течение 60 минут, что позволяет удалить с поверхности сапфира углеродные и кислородные загрязнения и обеспечить высокое качество структуры приповерхностной области слоя Si. Далее осаждается слой поликристаллического кремния методом высокочастотного распыления [9–15] с последующим проведением фотолитографии для формирования тензорезисторов. Травление слоев поликристаллического кремния методом избирательного анизотропного травления необходимо для последующего формирования контактов к резисторам [16].

Электрическая схема чувствительного элемента, имеет замкнутый измерительный мост [5, 17]. Контроль температуры в схеме ведётся по величине тока, протекающего через мостовую схему. Для подгонки измерительного моста и термокомпенсации в схему введена линейка подгоночных резисторов, включённых в противоположные плечи моста и вынесенных на одну сторону кристалла. Ввиду того, что все резисторы находятся в одинаковых условиях, это не только позволяет правильно сбалансировать схему, но также исключить возможность возникнове-

ния теплового разбаланса. Зависимость чувствительности датчика давления от отношения L/h приведена на рис. 1, где L – длина и ширина мембраны датчика давления; h – толщина мембраны датчика давления.

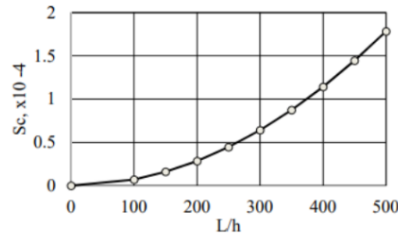


Рис. 1. Зависимость чувствительности датчика давления от отношения L/h

Керамика, которая использовалась как основа при производстве датчиков давления, уменьшает температурную погрешность преобразования из-за возможности лучшего согласования коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) керамики ($85\text{--}100 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$) и сапфировой ($60\text{--}75 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$) подложки, позволяет уменьшить стоимость технологического процесса из-за использования керамики вместо дорогостоящих титановых сплавов и сложной металлообработки (рис. 2) [18, 19]. Исходное керамическое основание разрезается с помощью лазера (модель LIMO 100-532/1064-U) с длиной волны 1064 нм, и после резки, шлифовки и полировки подвергается очистке.

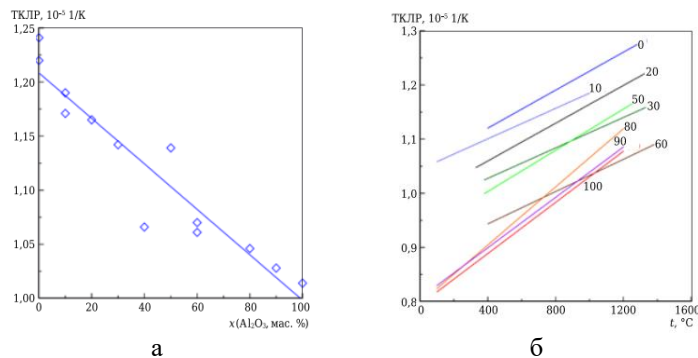


Рис. 2. а – усреднённые по температурному диапазону 300 – 1300 °С величины КЛТР (технические) керамики $x\text{Al}_2\text{O}_3 + (100 - x)\text{ZrO}_2(\text{Y})$; б – температурные зависимости истинных значений КЛТР при охлаждении образцов состава $x\text{Al}_2\text{O}_3 + (100 - x)\text{ZrO}_2(\text{Y})$; числа у линий соответствуют x – доле Al_2O_3 , мас. %

Полупроводниковый чувствительный элемент на основе КНС, применяя метод центрифугирования [20, 21], соединяется с основанием корпуса из керамического материала с помощью стекловидного диэлектрика системы $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ с коэффициентом линейного термического расширения (КЛТР), равному $82\text{--}88 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. Перед нанесением на керамическую подложку производится грануляция легкоплавкого неорганического диэлектрика системы $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ с удельной поверхностью $5000 \text{ см}^2/\text{г}$ (сухой помол). Для приготовления агрегативно устойчивой рабочей суспензии в полученный порошок добавляется изобутиловый спирт, в следующем соотношении 20 гр. порошка на 25 гр. спирта. Полученный раствор помещается в вибромельницу, в яшмовый барабан с яшмовыми шарами на 48 часов. Полученная агрегативно устойчивая суспензия может использоваться для нанесения методом центрифугирования равномерно распределённой стекловидной диэлектрической плёнки на подложке [22].

На заключительном этапе в керамическом основании формируется отверстие механическим методом.

3. Конструкция датчика и технологический маршрут. В конструкции разработанного чувствительного элемента датчика давления контактные площадки (выполненные, например, из алюминия) вынесены из зоны измерений, при этом токоразводка до контактных площадок осуществляется в виде линий коммутации, изготавливаемых из того же материала, что и контактные площадки. На рис. 3 изображена конструкция датчика давления, разработанного в рамках структуры «сапфир – стекловидный диэлектрик – керамика»,

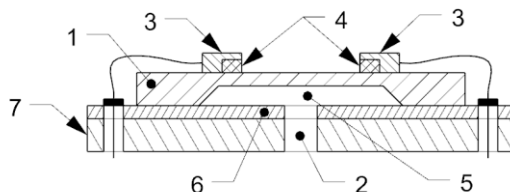


Рис. 3. Конструкция чувствительного элемента датчика давления на основе структуры КНС, размещённого на керамической подложке: 1 – сапфировая мембрана, 2 – отверстие, 3 – алюминиевые контактные площадки, 4 – поликристаллический кремний, 5 – полость, 6 – паяное соединение (стекловидный неорганический диэлектрик), 7 – керамическое основание

На рис. 4 представлен пример полного технологического маршрута создания датчика давления на основе структуры «сапфир – стекловидный диэлектрик – керамика».

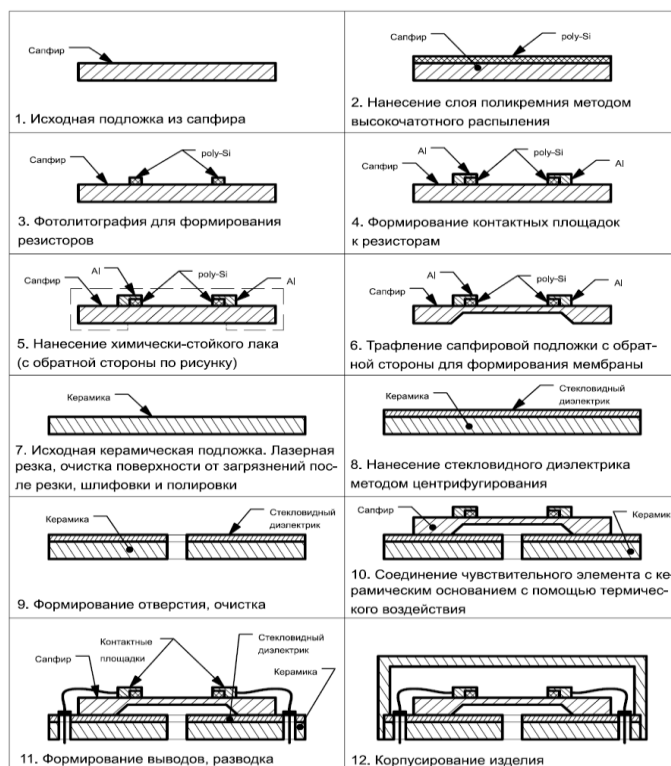


Рис. 4. Технологический маршрут создания датчика давления на основе структуры «сапфир – стекловидный диэлектрик – керамика»

3.1. Формирование тензочувствительного элемента на основе структуры «кремний на сапфире» (КНС). На сапфировую подложку диаметром ~80 мм, тщательно обработанную механической и химической полировкой, ориентированной в плоскости (1 $\bar{1}$ 02) осаждается слой поликристаллического кремния высокочастотным магнетронным распылением. Толщина нанесенного слоя составляет не более 5 мкм.

Следующим этапом проводилась фотолитография для формирования резисторов. Травление слоев поликристаллического кремния проводилась методом избирательного анизотропного травления.

Последующей операцией является формирование контактов к резисторам. Напыление алюминия и фотолитография для формирования контактной металлизации и контактных площадок необходимо для присоединения тензорезистивной схемы к внешним выводам корпуса.

Для вытравливания необходимых размеров «канавки», использовался химически стойкий лак, которым изолировался нанесенный слой кремния и сформированные контакты. Формирование сапфировой канавки осуществлялось с использованием метода химического травления. Для профилирования сапфир травился в смеси кислот H₂SO₄ 96% и H₃PO₄ 85% с использованием SiO₂ маски, сформированной травлением в стандартном буферном травителе. Скорость травления сапфира составляла (0,6–0,8) м/ч. Температура подложки варьировалась от 240 до 280°C.

3.2. Термическое спаивание тензочувствительного элемента и керамической подложки. На очищенную после резки, шлифовки и полировки керамическую подложку производилось нанесение методом центрифугирования рабочей суспензии легкоплавкого неорганического диэлектрика системы PbO–B₂O₃–ZnO в течение 3–5 минут при скорости вращения ротора на центрифуге 7000 об/мин.

Далее производилась сушка равномерно нанесенной стекловидной диэлектрической пленки в термошкафу при температуре 50–60°C в течение 3–5 мин.

После сушки осуществлялся высокотемпературный отжиг в муфельной печи при T<580°C. Для уменьшения механических напряжений была введена изотермическая выдержка продолжительностью 10 мин. при T=320°C.

Некристаллизующиеся стекловидные плёнки легкоплавкого неорганического диэлектрика обладают хорошей адгезией к материалам подложек, согласованностью по коэффициенту линейно-термического расширения (КЛТР=82–88×10⁻⁷ K⁻¹) между компонентами структуры и температурами их формирования, позволяющими получить наиболее равномерное по толщине и однородности стекловидное диэлектрическое покрытие.

Формирование отверстия в структуре «стекловидный диэлектрик – керамика» производится механическим методом с дальнейшим проведением процесса очистки сформированных отверстий.

Следующим этапом сборки датчика давления является соединение чувствительного элемента с керамическим корпусом. Предварительно получив структуру «стекловидный диэлектрик – сапфир» системы PbO–B₂O₃–ZnO методом центрифугирования при скорости вращения ротора центрифуги 7000 об/мин в течение 3–5 мин. и при высокотемпературном отжиге в муфельной печи при T<560–580°C продолжительностью 5–7 мин. сапфировый чувствительный элемент соединяется с основанием корпуса из керамического материала, посредством стекловидного диэлектрика системы PbO–B₂O₃–ZnO с помощью груза (массой 200 гр.), при T<580 °C и с выдержкой 5–7 минут.

В заключении производится формирование электрических выводов к контактным площадкам тензопреобразователя давления, выводам корпуса, а также герметизация и корпусирование датчика давления.

Заключение. В результате, датчик давления, выполненный на основе структуры КНС обладает высокой чувствительностью и стабильностью. В свою очередь, использование керамического основания позволяет уменьшить температурную погрешность датчика ввиду лучшего согласования коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) керамики ($85-100 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$) и сапфировой подложки ($60-75 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$), а также уменьшить стоимость технологического процесса из-за использования керамики вместо дорогостоящих титановых сплавов и сложной металлообработки.

Таким образом, структура «сапфир – стекловидный диэлектрик – керамика» показывает возможность повышения чувствительности датчика и снижения погрешности при расширении его функциональных возможностей, упрощении конструкции и повышении технологичности изготовления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Скворцов П.А.* Разработка методики расчёта и проектирования упругого элемента тензодатчика на структуре «кремний на сапфире»: дисс. ... канд. тех. наук: 01.02.06. – М.: Московский политехнический университет, 2019.
2. *Хошев А.В.* Тензорезистивные плёнки и их применение в датчиках давления // Современная техника и технологии. – 2014. – № 10.
3. *Михайлов П.Г., Мокров Е.А., Сергеев Д.А., Скотников В.В., Петрин В.А., Чернецов М.А.* Чувствительные элементы высокотемпературных датчиков давления. Материалы и технологии изготовления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 4 (153). – С. 204-213.
4. *Устинов А.А., Нагорнов Ю.С., Козлов А.И.* Сравнительные характеристики однослойных и двухслойных тензопреобразователей давления на основе структур кремний–на–сапфире // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2012. – № 1. – С. 66-67.
5. *Коновалов Р.С., Львов А.А.* Высокотемпературные датчики давления // Тр. международного симпозиума "Надежность и качество". – 2014. – Т. 2. – С. 48-50.
6. *Гурин С.А., Печерская Е.А., Зинченко Т.О., Фимин А.В., Николаев К.О.* Конструкции и технологические режимы формирования чувствительных элементов микроэлектронных датчиков быстропеременного и статического давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 111-118.
7. *Михайлов П.Г., Смогунов В.В., Вольников М.И.* Технологии формирования гетероструктур измерительных преобразователей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 3 (55). – С. 58-67.
8. *Шокоров В.А., Смирнов И.И.* Разработка и применение высокотемпературных датчиков давления для реактивных двигателей ракетно-космической техники // Тр. международного симпозиума "Надежность и качество". – 2018. – Т. 2. – С. 60-62.
9. *Берлин Е.В., Сейдман Л.А.* Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением. – 2-е изд., испр. и доп. URSS. – 2022. – 316 с. – ISBN 978-5-9710-9680-1.
10. *Васильев В.А., Хошев А.В.* Применение магнетронного распыления для получения тонких плёнок гетерогенных структур нано- и микроэлектромеханических систем // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2014. – Т. 14, № 3. – С. 144-147.
11. *Goncharov E, Saaenko A., Malyukov S., Palii A.* Formation of ITO Thin Films by MF Magnetron Sputtering for Solar Cells Application // Processing of ITNT 2021 – 7th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology. – 2021.
12. *Данилина Т.И., Троян П.Е., Сахаров Ю.В., Жидик Ю.С.* Ионно-плазменные методы получения наноструктур // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 40-45.
13. *Колобов Н.А., Шелегеда Е.В.* Исследование поперечной проводимости пленок поликристаллического кремния, полученных методом магнетронного распыления // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2012. – № 5. – С. 28-37.
14. *Климович И.М., Романов И.А., Комаров Ф.Ф., Зайков В.А., Власукова Л.А., Осин Ю.Н., Рогов А.М., Воробьев В.В., Степанов А.Л.* Особенности формирования тонких пленок кремния, осаждаемых магнетронным распылением // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 6. – С. 35-41.

15. Волочко А.Т., Зеленин В.А., Мельник Н.Ю. Сплавы системы Cr-Ni-Si для получения резистивных элементов интегральных микросхем методом магнетронного распыления // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 35-42.
16. Величко А.А., Илюшин В.А., Филимонова Н.И., Крупин А.Ю., Кацюба А.В. Тензорезисторы на структурах "кремний на сапфире" (КНС) и Si/CaF₂/Si // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2018. – № 2 (39). – С. 30-39.
17. Лапин А.П., Гайфулин Н.М., Сулейманова Л.Н., Юнусова Г.Р. Методика изучения физических эффектов, используемых для измерения давления // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 160-168.
18. Комоликов Ю.И., Кацеев И.Д., Хрустов В.Р. Термическое расширение композиционной керамики системы диоксид циркония – оксид алюминия // Новые огнеупоры. – 2016. – № 9. – С. 59-62.
19. Стучебников В.М., Устинов А.А., Нагорнов Ю.С. Исследование температурного дрейфа и нелинейностей тензопреобразователей давления на основе керамики // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 2 (14). – С. 62-69.
20. Соколов В.И. Центрифугирование. – М.: Химия, 1976. – 408 с.
21. Панфилова Е.В., Гришаев Н.А. Отработка и исследование процесса получения фотоннокристаллических пленок методом центрифугирования // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – № 4 (112).
22. Клунникова Ю.В., Бондарчук Д.А. Формирование спая стекловидного диэлектрика и сапфира для элементов микроэлектроники // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – С. 67-73.

REFERENCES

1. Skvortsov P.A. Razrabotka metodiki rascheta i proektirovaniya uprugogo elementa tenzodatchika na strukture «kremniy na sapfire»: diss. ... kand. tekh. Nauk [Development of a method for calculating and designing an elastic element of a strain gauge on the structure "silicon on sapphire": cand. of eng. sc. diss.]: 01.02.06. Moscow: Moskovskiy politekhnicheskii universitet, 2019.
2. Khoshev A.V. Tenzorezistivnye plenki i ikh primenenie v datchikakh davleniya [Tensoresistive thin films and their use in pressure sensors], *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii* [Modern technics and technologies], 2014, No. 10.
3. Mikhaylov P.G., Mokrov E.A., Sergeev D.A., Skotnikov V.V., Petrin V.A., Chernetsov M.A. Chuvstvitel'nye elementy vysokotemperaturnykh datchikov davleniya. Materialy i tekhnologii izgotovleniya [Sensitive elements of high- pressure sensors. Materials and technologies izgotovleniya], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 4 (153), pp. 204-213.
4. Ustinov A.A., Nagornov Yu.S., Kozlov A.I. Sravnitel'nye kharakteristiki odnosloynnykh i dvukhsloynnykh tenzopreobrazovateley davleniya na osnove struktur kremniy-na-sapfire [Comparative characteristics of single-layer and double-layer pressure transducers based on silicon-on-sapphire structures], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Materialy elektronnoy tekhniki* [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Materialy elektronnoy tekhniki], 2012, No. 1, pp. 66-67.
5. Konovalov R.S., L'vov A.A. Vysokotemperaturnye datchiki davleniya [High temperature pressure sensors], *Tr. mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* [International Symposium "Reliability and quality"], 2014, Vol. 2, pp. 48-50.
6. Gurin S.A., Pecherskaya E.A., Zinchenko T.O., Fimin A.V., Nikolaev K.O. Konstruktsii i tekhnologicheskie rezhimy formirovaniya chuvstvitel'nykh elementov mikroelektronnykh datchikov bystroperemennogo i staticheskogo davleniya [Structures and technological regimes of forming sensitive elements of microelectronic sensors of fast alternating and static pressure], *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measuring. Monitoring. Management. Control], 2019, No. 3 (29), pp. 111-118.
7. Mikhaylov P.G., Smogunov V.V., Vol'nikov M.I. Tekhnologii formirovaniya geterostruktur izmeritel'nykh preobrazovateley [Technologies for heterostructures formation of transducer], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Technical sciences], 2020, No. 3 (55), pp. 58-67.

8. *Shokorov V.A., Smirnov I.I.* Razrabotka i primeneniye vysokotemperaturnykh datchikov davleniya dlya reaktivnykh dvigateley raketno-kosmicheskoy tekhniki [Development and application of high-temperature pressure sensors for jet engines of rocket and space technology], *Tr. mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* [International Symposium "Reliability and quality"], 2018, Vol. 2, pp. 60-62.
9. *Berlin E.V., Seydman L.A.* Poluchenie tonkikh plenok reaktivnym magnetronnym raspyleniem [Preparation of thin films by reactive magnetron sputtering]. 2nd ed., corr. and suppl. URSS, 2022, 316 p. ISBN 978-5-9710-9680-1.
10. *Vasil'ev V.A., Khoshev A.V.* Primeneniye magnetronnogo raspyleniya dlya polucheniya tonkikh plenok geterogennykh struktur nano- i mikroelektromekhanicheskikh sistem [Application of magnetron sputtering to obtain thin films of heterogeneous structures of nano- and microelectromechanical systems], *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya* [Fundamental problems of radio-electronic instrumentation], 2014, Vol. 14, No. 3, pp. 144-147.
11. *Goncharov E., Saaenko A., Malyukov S., Palii A.* Formation of ITO Thin Films by MF Magnetron Sputtering for Solar Cells Application, *Processing of ITNT 2021 – 7th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology*, 2021.
12. *Danilina T.I., Troyan P.E., Sakharov Yu.V., Zhidik Yu.S.* Ionno-plazmennyye metody polucheniya nanostruktur [Ion-plasma methods to obtain nanostructures], *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Proceedings of TUSUR University], 2017, Vol. 20, No. 3, pp. 40-45.
13. *Kolobov N.A., Shelegeda E.V.* Issledovanie poperechnoy provodimosti plenok polikristallicheskogo kremniya, poluchennykh metodom magnetronnogo raspyleniya [Investigation of the transverse conductivity of polycrystalline silicon films obtained by magnetron sputtering], *Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN* [Bulletin of the Lebedev Physics Institute], 2012, No. 5, pp. 28-37.
14. *Klimovich I.M., Romanov I.A., Komarov F.F., Zaykov V.A., Vlasukova L.A., Osin Yu.N., Rogov A.M., Vorob'ev V.V., Stepanov A.L.* Osobennosti formirovaniya tonkikh plenok kremniya, osazhdaemykh magnetronnym raspyleniem [Features of formation of thin silicon coatings deposited by magnetron sputtering], *Doklady Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, Vol. 61, No. 6, pp. 35-41.
15. *Volochko A.T., Zelenin V.A., Mel'nik N.Yu.* Splavy sistemy Cr-Ni-Si dlya polucheniya rezistivnykh elementov integral'nykh mikroskhem metodom magnetronnogo raspyleniya [Alloys of the Cr-Ni-Si system for obtaining resistive elements of integrated microcircuits by magnetron sputtering], *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2020, Vol. 65, No. 1, pp. 35-42.
16. *Velichko A.A., Ilyushin V.A., Filimonova N.I., Krupin A.Yu., Katsyuba A.V.* Tenzorezistory na strukturakh "kremniy na sapphire" (KNS) i Si/CaF₂/Si [Tenzoresistors based on silicon and Si/CaF₂/Si on sapphire structures], *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii* [Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences], 2018, No. 2 (39), pp. 30-39.
17. *Lapin A.P., Gayfulin N.M., Suleymanova L.N., Yunusova G.R.* Metodika izucheniya fizicheskikh effektov, ispol'zuemykh dlya izmereniya davleniya [Method of Studying Physical Effects and Phenomena in the Measurement of Pressure], *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics], 2019, Vol. 19, No. 1, pp. 160-168.
18. *Komolikhov Yu.I., Kashcheev I.D., Khrustov V.R.* Termicheskoe rasshirenie kompozitsionnoy keramiki sistemy dioksid tsirkoniya – oksid alyuminiya [Thermal expansion of composite ceramics of the system zirconium dioxide – aluminum oxide], *Novye ogneupory* [Novye ogneupory], 2016, No. 9, pp. 59-62.
19. *Stuchebnikov V.M., Ustinov A.A., Nagornov Yu.S.* Issledovanie temperaturnogo dreyfa i nelineynostey tenzopreobrazovateley davleniya na osnove keramiki [Study of temperature drift and nonlinearities of pressure strain gauges based on ceramics], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University proceedings. Volga region. Technical sciences], 2010, No. 2 (14), pp. 62-69.

20. Sokolov. V.I. Tsentrifugirovanie [Centrifugation]. Moscow: Khimiya, 1976, 408 p.
21. Panfilova E.V., Grishaev N.A. Otrabotka i issledovanie protsessa polucheniya fotonno-kristallicheskih plenok metodom tsentrifugirovaniya [Development and study of the process of photonic-crystal film depositing by centrifugation], *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2021, No. 4 (112).
22. Klunnikova Yu.V., Bondarchuk D.A. Formirovanie spaya steklovidnogo dielektrika i sapfira dlya elementov mikroelektroniki [Junction formation of glassy dielectric and sapphire for microelectronic elements], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, pp. 67-73.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

Малюков Сергей Павлович – Южный федеральный университет; e-mail: spmalyukov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра радиотехнической электроники и наноэлектроники; д.т.н.; профессор; член-корреспондент РАЕН.

Мишнев Виктор Дмитриевич – e-mail: mishnev@sfedu.ru; тел.: +79189529271; кафедра радиотехнической электроники и наноэлектроники; аспирант.

Malyukov Sergey Pavlovich – Southern Federal University; e-mail: spmalyukov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of radio engineering electronics and nanoelectronics; dr. of eng. sc.; professor.

Mishnev Victor Dmitrievich – e-mail: mishnev@sfedu.ru; phone: +79189529271; the department of radio engineering electronics and nanoelectronics; postgraduate student.

УДК. 621.396.66+06

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-119-128

**И.А. Алферова, Д.Д. Габриэльян, Б.Х. Кульбикаян, О.А. Сафарьян,
Л.Н. Стажарова**

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТНОГО ШУМА В КАНАЛЕ СВЯЗИ НА ВЕРОЯТНОСТЬ БИТОВОЙ ОШИБКИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ КАМ СИГНАЛОВ

Целью статьи является анализ совместного влияния амплитудного белого гауссовского шума (АБГШ), присутствующего в канале связи, и частотного шума (ЧШ), возникающего вследствие флуктуации частоты сигнала в канале связи, на вероятность битовой ошибки при обработке КАМ-сигналов. Решаемые задачи исследования: 1. Разработка математической модели обработки КАМ-сигнала с учетом совместного воздействия АБГШ и ЧШ в канале связи. 2. Численное исследование совместного влияния АБГШ и ЧШ на вероятность битовой ошибки при обработке КАМ сигналов. Предложена математическая модель, устанавливающая взаимосвязь между отношением сигнал/шум в канале и средним квадратическим отклонением частоты сигнала, с одной стороны, и вероятностью битовой ошибки при демодуляции КАМ-сигнала, с другой. Приведена визуализация эффектов, связанных с наличием АБГШ и ЧШ в канале на сигнальное созвездие принимаемого КАМ-сигнала. Выявлены основные закономерности, связанные с совместным воздействием АБГШ и ЧШ в канале связи, к которым относятся: - появление ЧШ в канале связи приводит к снижению уровня сигнала в канале при корреляционной обработке принимаемого сигнала и соответствующему снижению ОСШ; - снижение ОСШ вызывает дополнительно к размытию сигнального созвездия в азимутальном направлении, связанному с появлением интегральной флуктуации фазы из-за флуктуации частоты в течение импульса, увеличение размытия сигнального созвездия в радиальном направлении. На основе полученных результатов сделан вывод о необходимости более полного учета отклонений параметров сигналов в канале, обусловленных как наличием АБГШ, так и ЧШ.

Амплитудный белый гауссовский шум; флуктуация частоты сигнала; частотный шум; вероятность битовой ошибки.