

А.О. Кабдолдина¹, Ж.Р. Уалиев^{1,2}, Қ.М. Сансызбай³,
Н.О. Кабдолдина^{1,4}, А.А.Қыдырбаева⁵

¹Институт механики и машиностроения им. Академика У.А. Джолдасбекова,
Алматы, Казахстан

²Институт цифровой техники и технологии, Алматы, Казахстан

³Академия логистики и транспорта, Алматы, Казахстан

⁴Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан

⁵Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан

E-mail: k.sansizbay@alt.edu.kz

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО СЕНСОРА, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. Предметом исследования является проектирование и технология изготовления композитных волоконно-оптических датчиков. Они используются в режиме жесткой эксплуатации. Суть задачи заключается в исследовании конструкции и совместимости оптических и микромеханических свойств для одновременного измерения нескольких физических величин. В этом отношении выбранный метод модульного преобразования решает проблему комбинированности измерения. Разработанная конструкция и технология электрического соединения значительно снижают внутренние механические напряжения датчика и повышают стабильность работы комбинированного датчика в экстремальных условиях эксплуатации. Аналитические модели, связывающие величину и ориентацию внутренних механических напряжений с характеристиками временной устойчивости для сложных конструкций, как правило, отсутствуют. На практике полученные результаты исследований могут быть применены к комбинированным датчикам давления и температуры, давления и вибрации и т.д.

Ключевые слова. Оптическое волокно, датчик, формирование, электрическое соединение, травление, устойчивость, комбинация функций.

Введение.

Исследование при создании нового вида датчиков для измерения физических величин разного характера параллельно в настоящее время становится все более популярной. Создание теории многофакторных измерений - сложный процесс, связанный с моделированием, технологическими проблемами, аппаратными задачами и т.д. В настоящее время перспективным направлением является разработка комплекса волоконно-оптических датчиков (ВОД), которые, в принципе, обладают универсальностью, но при условии решения ряда сложных конструктивных и технологических проблем, которые все еще препятствуют их использованию в экстремальных условиях эксплуатации. Давайте рассмотрим их более подробно.

В настоящее время все чаще разрабатываются устройства для измерения физических величин (ФВ) во многих отраслях промышленности, включая авиацию. В настоящее время все чаще разрабатываются приборы для измерения физических величин (ФВ) во многих отраслях промышленности, включая космическую и авиационную. Это обусловлено такими преимуществами, как их низкое энергопотребление, пожаро- и взрывобезопасность, устойчивость к радиационному воздействию и конфиденциальность информации.

Мировыми производителями оборудования являются Siemens, ABB, Roctest, Weatherford, Baker Hughes, Halliburton, Schlumberger, а также российские предприятия Omega, Optolink, Intel-Systems.

Все виды ВОД можно разделить на амплитудно-модулирующие характеристики светового потока (интенсивность, оптическую траекторию), и частотно-фазовые модуляторы. Амплитудные ВОД обладают недостаточной временной и параметрической стабильностью, что связано с общей проблемой недостаточной стабильности методов амплитудной модуляции. Методы частотной и фазовой модуляции более стабильны. С другой стороны, для корректной работы ВОД, основанной на частотной и фазовой модуляции, требуется специализированный дорогостоящий анализатор спектра. В связи с этим использование одиночных датчиков с брэгговскими решетками экономически нецелесообразно. Следовательно, необходимо разработать и применять модульные ВОД, в которых основным модулем является амплитудный преобразователь, например, луч или мембрана, а затем в качестве второго модуля используется волоконный преобразователь, что позволяет объединить преимущества принципов амплитудного и фазочастотного преобразования в едином ВОД. Таким образом, будет решена проблема информационного и конструктивно-технологического объединения и преобразования различных ВОД одним датчиком.

Обзор литературы и постановка проблемы.

В источниках [1-3] описаны особенности датчиков с точки зрения их необходимости, конструкции, технологии и дальнейшей эксплуатации. Они не решают проблему совместимости одновременного измерения разных физических величин одним датчиком.

В работе [1-3] описан спрос на датчики и их особенности в конструкции, технологии и дальнейший функционирование. Они не решают проблему совместимости комбинированного измерения различных физических величин одним датчиком.

В работе [4] представлены итоги анализа и строение датчика давления с несколькими каналами. Основным недостатком датчика и технологии его изготовления является разделение каналов подачи лазерного луча и измерительного канала, что не позволяет организовать другой канал для физического параметра, отличного от давления. Отмеченные конструкция и технология изготовления датчиков имеют существенный недостаток: разделение каналов подачи лазерного луча и измерительного канала, что не позволяет организовать другой канал для физического параметра, отличного от давления.

В статье [5] описаны методы обеспечения стабильности микроэлектронных датчиков путем предоставления конструктивных решений (однослойные или многослойные тензочувствительные пленки, разработка технологии формования и т.д.). Однако такой подход не приводит к возможности комбинированного преобразования и не предусматривает групповых производственных процессов.

В работе [6] рассмотрена несколько видов ФОС, применяемые в медицине для различного использования. Данные ФОС не могут быть использованы в жестких условиях работы, кроме того, их производства сложная, поскольку он включает операции профилирования и послетепловой экстракции кремнеземных волокон, что является плохо контролируемым процессом.

В статье [4] описаны исследования конструкции ФОС, основанные на оптико-акустических волновых процессах. Недостатками данного способа и конструкции являются наличие разрядов и отключений в условиях вибраций и значительных температур.

В работе [7] рассмотрены и проанализированы конструкция и результаты исследований волоконно-оптического датчика, основанного на принципе

интерференционного преобразования. Подробно описан сложный математический метод преобразования выходных сигналов с параметрами 0,053 %, 280 кПа и 2-20 км. Методы преобразования и конструкция датчика довольно сложны, и трудно измерить другие параметры.

В статье [8] рассматриваются имеющийся методы и конструкции ВОД, используемых в медицинских приложениях. Представлены достаточно затратные технологии. Недостатками являются трудность изготовления и дороговизна датчиков.

Принципиальными недостатками рассмотренных методов и конструктивных решений являются сложность встраивания канала с другой измеряемой физической величиной, которая чаще всего имеет аналоговую форму [9].

Эти подходы к исследованию не лишены недостатков с точки зрения сложности и низкой повторяемости технологий и методов реализации, поэтому необходимо сочетать микромеханический принцип преобразования и использование волоконно-оптических принципов измерения [10].

Все это позволяет утверждать, что целесообразно провести исследование конструкции и технологии создания совмещенных экспортно-оптических датчиков, используемых для жестких условий эксплуатации.

Цель и задачи исследования.

Целью исследования является выбор информативных методов для преобразования и последующей реализации многофункционального датчика на основе оптических и микромеханических модулей.

Для достижения поставленной цели выполняются следующие задачи:

- исследовать проблемный уровень состояния разработки многофункциональных датчиков;
- проанализировать характерные известные структуры и методы измерения различных физических величин с использованием одного датчика;
- исследование и анализ технологически и конструктивно совместимых методов преобразования различных физических величин;
- разработка технологических процессов изготовления оптических и микромеханических модулей;
- разработка и тестирование конструкции комбинированного датчика.

Материалы и методы.

Цель исследования - разработать и внедрить метод создания многофункциональных датчиков, сочетающих в себе волоконно-оптические элементы со свойствами, соответствующими экстремальным условиям эксплуатации.

Когда аналоговый сигнал передается на оптическую ветвь датчика, помех, таких как диффузия и другие оптические эффекты, не возникает.

Предполагается, что технология электроадгезионного соединения, используемая при изготовлении комбинированных датчиков, не создает механических напряжений и не вызывает межканальных помех.

При разработке технологических математических моделей не учитывались нелинейные эффекты, возникающие при образовании отдельных комплексных соединений в системе кремний-стекло.

Метод исследования - анализ процессов переноса излучения в оптических волокнах и их численное моделирование. Основой математического моделирования является уравнения геометрической оптики и волновой оптики. Для разработки аналитической и численной моделей процессов переноса использовалась программа

Simulink. Кроме того, использовалось программное обеспечение для моделирования электрических цепей.

Результаты проектирования и технологии изготовления комбинированных волоконно-оптических датчиков, используемых в экстремальных условиях эксплуатации.

1. Анализ структур и методов измерения различных физических величин с использованием одного датчика.

Давайте рассмотрим методы измерения различных ФВ с использованием одного датчика, для чего представим обобщенную структуру ВОД (рисунок 1).

Структура ВОД содержит оптическое волокно, светоизлучающее (источник света) и светоприемное устройства, оптический чувствительный элемент.

На рисунке 1 показано, что на модуль преобразователя одновременно воздействуют два измеряемых ФВ: давление и температура, которые изменили свои параметры.



Рисунок 1 – Структурная схема волоконно-оптических датчиков (собственный чертеж)

Примером модуляции ФВ является схема чувствительного элемента, в которой под воздействием светового луча изменяется сопротивление ограниченной секции тензодатчика или постоянное сопротивление.

Этот метод позволяет осуществлять всесторонний мониторинг характеристик датчика, с одной стороны, измеряя давление традиционным тензорезистивным методом, и, с другой стороны, контролируя его сопротивление с помощью оптического луча. Методы управления и принцип введения зондирующего луча показаны на рисунке 2.

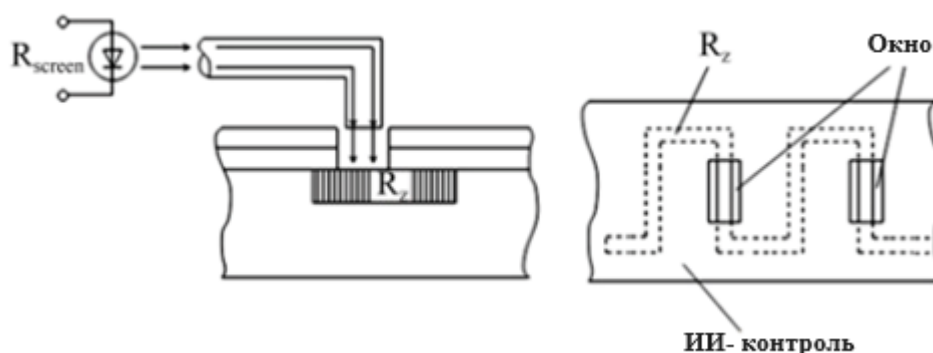
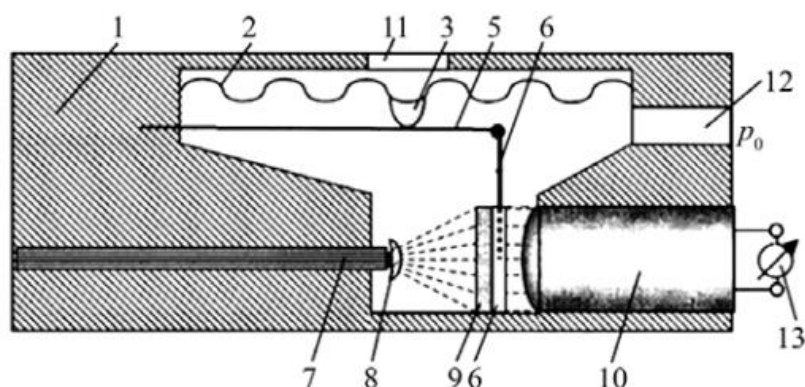


Рисунок 2 – Схема контроля сопротивления тензодатчика с использованием подачи оптического луча по оптическому волокну (открытый чертеж)

Как отмечалось ранее, комбинированный преобразовательный модуль содержит ряд опто- и микромеханических структур, воздействующих на оптическое волокно или на сам оптический луч, которые модулируют его характеристики (рисунок 3) [10].

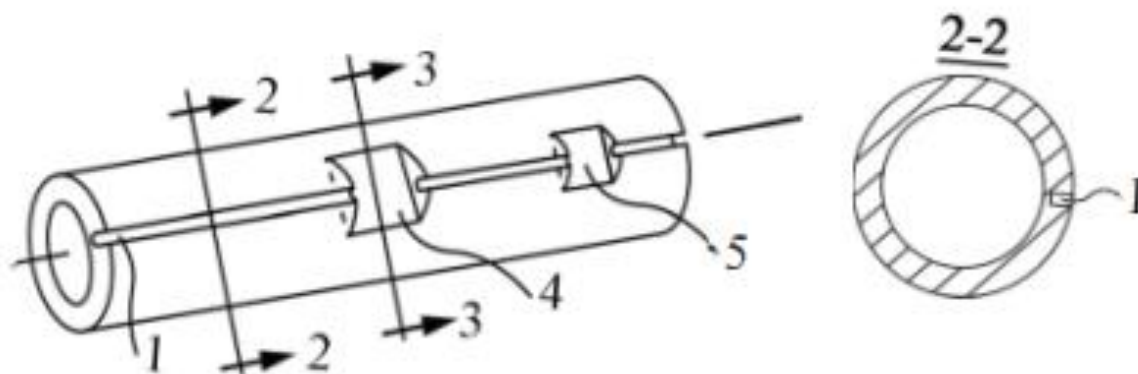


1 – корпус; 2 – гофрированная биметаллическая мембрана; 3 – жесткий центр,
4 – пластина; 5 – шторка; 6 – прорезь; 7 – оптоволокну; 8 – линза; 9 – диафрагма;
10 – фотодиод; 11 – подача измеряемого давления;
12 – контрольное давление; 13 – индикатор [9].

Рисунок 3 – Схема волоконно-оптических датчиков давления и температуры

В качестве примера конструкций распределенных оптических датчиков давления и температуры приведен в [11] – рисунок 4.

В источнике [12] приведены технологические способы сборки, которые не обеспечивают стабильность характеристик устройств.



1 – концентратор напряжений; 2-2 и 3-3 – поперечные сечения чувствительного модуля; 4 – тензочувствительная конструкция; 5 – термочувствительная конструкция.

Рисунок 4 – Распределенный оптический датчик давления и температуры [10]

Волоконно-оптический носитель, имеющий расположенную на нем группу оптических датчиков, включающий герметичную полую оболочку, имеющую боковую стенку, профилированную по меньшей мере в одной заданной области для образования тонкостенной детали, и в которой по меньшей мере один оптический датчик прикреплен к поверхности указанной тонкостенной детали в таком образом, что при давлении, разнице давлений, давление, оказываемое на эту тонкостенную деталь, изгибается, и эта разность давлений воспринимается, по меньшей мере, одним датчиком, а герметичная полая оболочка представляет собой трубку.

Для микромеханических модульных ВОД используются специальные технологии, характерные для МЭМС-технологий, в которых основными являются управляемые

процессы формообразования. К ним относятся: процессы: наращивание материалов (формирование металлических и изоляционных пленок, в том числе сварка, склеивание и пайка); удаление материалов (жидкостное и газовое травление, ионная и жидкостная очистка и др.) [14]. Технологический процесс изготовления микроэлектронной ВОД схематически показан на рисунке 5.

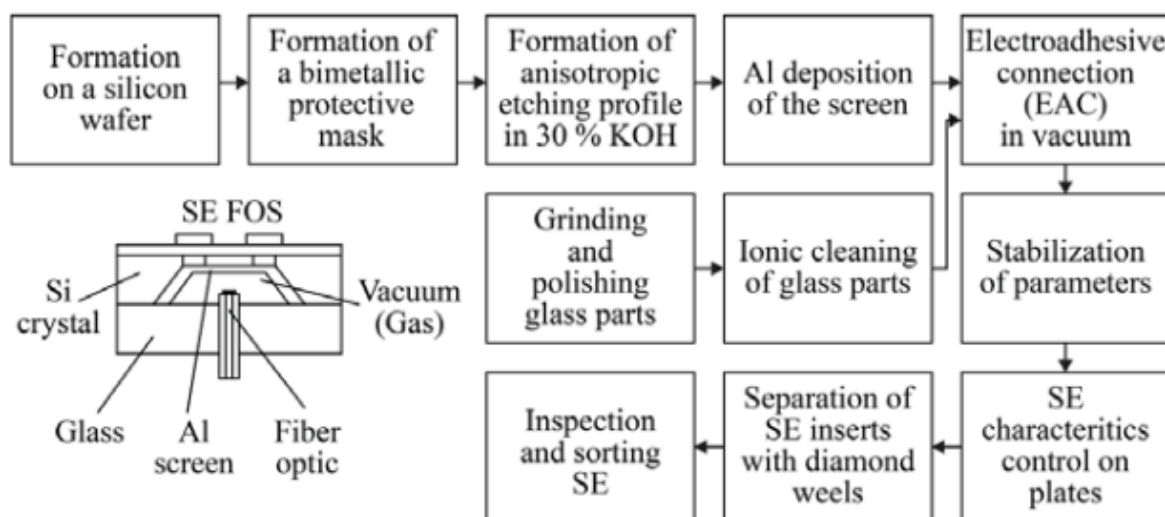


Рисунок 5 – Процесс изготовления микроэлектронных волоконно-оптических датчиков давления и температуры (на чертеже)

2. Исследование и анализ конструктивной и технологической совместимости волоконно-оптических датчиков.

При проведении поиска и последующего анализа на предмет конструктивной и технологической совместимости отдельных элементов и сборок следует обращать внимание на следующие факторы:

- технологические операции по изготовлению чувствительных элементов должны быть близкими и выполнимыми;
- элементы конструкции и их размеры должны повторяться;
- одним из основных критериев является временная и параметрическая стабильность электрофизических параметров.

Как показал анализ физических явлений, применительно к волоконно-оптическим и микромеханическим структурам наиболее применимыми являются явления и эффекты, проявляющиеся в полупроводниковых структурах, например, деформации и тепловые явления, оптические эффекты, эффекты массопереноса носителей заряда и так далее. В то же время в наноструктурах наблюдается очень большое количество совместимых явлений, хотя они часто обладают недостаточной временной и параметрической стабильностью [13].

3. Модульные оптоволоконные датчики давления и температуры.

При исследовании разработанных комбинированных датчиков был применен обобщающий метод анализа конструкций и материалов датчиков.

Отметим некоторые важные особенности конструкции и технологических операций модульной ВОД. Поскольку аналоговый модуль ВОД представляет собой сложную гетерогенную структуру (рисунок 6), то для получения параметрической и временной стабильности всей ВОД необходимо обеспечить конструктивную, функциональную и технологическую совместимость материалов.

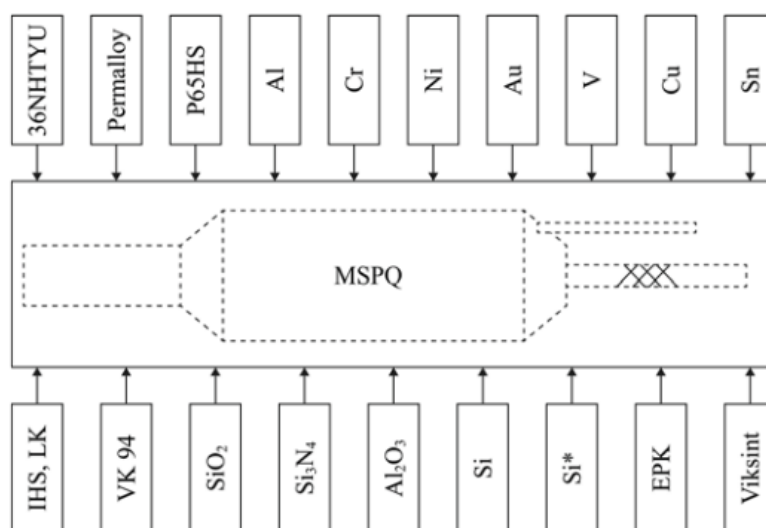


Рисунок 6 – Микроэлектронный датчик физических величин как сложная гетерогенная система

С позиций материаловедения он состоит из различных материалов: металлов, сплавов, стекла, керамики, полупроводников, изоляторов, герметиков, пластмасс и т. д., например, сплавы титана и элинвара, для корпусных и силовых материалов используются нержавеющие стали: ковар, а также различные клеи и герметики для герметизации и неразъемных соединений (рисунок 6). В качестве материалов изоляторов и деталей подшипников используются щелочные, боросиликатные, кварцевые, аморфные и поликристаллические стекла. В качестве материала изоляторов и чувствительных элементов используют оксид алюминия (корунд), муллитовую керамику, пьезокерамику. Из полупроводниковых материалов применяют кремний, а полупроводниковые соединения – карбид кремния, арсенид галлия, полупроводниковые структуры – кремний на сапфире, кремниевый диэлектрик – кремний. Для ВОД наряду с вышеперечисленными материалами используются еще одномодовые и многомодовые кварцевые оптические волокна.

Предполагается, что существует несколько вариантов эскизов ВОД [23]:

- 1) Амплитудная модуляция генерируемого оптрона давлением и температурой (канал П-давление и канал Т-температура) – рисунок 7.
- 2) Фазовая модуляция за счет использования брэгговских решеток, сформированных на волокне [24].
- 3) Использование первичной ячейки MEMS [25].

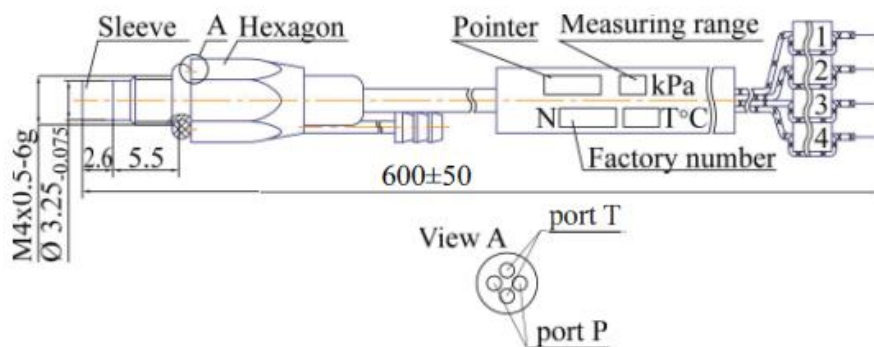


Рисунок 7 – Конструкция 2-канальных волоконно-оптических датчиков

Конструктивные модели многофункциональных волоконно-оптических датчиков [26]. Это версия ВОД с амплитудной модуляцией, в которой используются два канала: давления и температуры, которые изменяют интенсивность отраженных оптических лучей.

Результаты и обсуждения.

Были исследованы различные способы обработки на технологическую совместимость, установлено, что для превращения соединения в единый модуль необходимо обрабатывать соединяемые поверхности путем их активации различными способами: обработка в плазме тлеющего разряда; электронные пучки; бомбардировка пучками ионов, например В⁺, Р⁺; ускоренные пучки инертных газов He, Ar; обработка инертных газов во фторированной плазме [20, 21].

Технологический процесс изготовления микроэлектронного Фокуса схематически показан на рисунке 5.

В наибольшей степени чистота процесса и минимизация внутренних механических напряжений обеспечиваются разработкой и внедрением технологии ЭАС и приготовлением качественно соединяемых деталей [18, 19] в единое целое.

Разработка и испытания конструкции комбинированного датчика проводятся при реализации технологии изготовления (рисунок 5) и на готовых датчиках (рисунок 7) [20, 26, 27].

Следует отметить, что в исследованиях по технологическому обеспечению использовалась традиционная технология (рисунок 5), при которой МЭМС-модуль изготавливался на стороннем предприятии, а ЧЭ собирался и монтировался авторами самостоятельно. Результаты обеспечения временной и параметрической стабильности оценивались с использованием данных, полученных для микроэлектронных датчиков, описанных в [11].

Разработанные методы и конструкции нуждаются в дальнейшем моделировании с помощью программного обеспечения и моделей, основанных на технологиях моделирования, таких как COMSOL, Ansys и Simulink. Для развития результатов исследований остро необходимы две вещи: решение вопросов с изготовлением МЭМС СЭ для различных фотоэлектрических систем и оснащение разработчиков современными программными пакетами для моделирования.

При этом проблема изготовления микромеханических модулей сторонних производителей является одной из основных проблем, требующих решения.

Заключение.

1. Исследования существующих конструкций датчиков и методов измерения показали приоритет комбинированных датчиков в экстремальных условиях. Такие датчики обладают очень высокой помехоустойчивостью, пожаро-взрывобезопасностью и могут использоваться в широком диапазоне температур и давлений.

2. Были исследованы совместимые методы преобразования, и оказалось, что они наиболее распространены в областях микромеханики и оптомеханики. Применяемые в этих областях методы группового изготовления позволяют формировать сенсорные элементы небольших размеров и жестких допусков. С другой стороны, известные методы измерений, для которых основными измеряемыми параметрами являются частота и фаза оптического излучения, требуют сложного и дорогостоящего анализатора оптического спектра. В связи с этим метод преобразования амплитуды был принят как наиболее простой и наиболее совместимый с существующими интерфейсами.

3. Преимуществом предлагаемого метода модульной системы измерения физических величин является аппаратная простота и отсутствие требований к приобретению программ и обучению персонала.

4. Преимущества предлагаемой технологии электроадгезивного соединения заключаются в обеспечении стабильности благодаря отсутствию внутренних механических напряжений и возможности соединения различных небольших компонентов.

5. Как показывают анализы предлагаемой конструкции модульных датчиков и качества технологии их производство (установка, управление) можно освоить с помощью несложного технического оборудования. Технология подключения также может быть реализована с использованием простого оборудования и технологического процесса.

Финансирование. Авторы выражают искреннюю благодарность за финансовую поддержку Министерству науки и высшего образования Республики Казахстан: грант на проведение фундаментальных исследований ИММаш им. У.А.Джолдасбекова (номер гранта: BR20280990).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ghorat M., Gharehpetian G. B., Latifi H., Hejazi M. A., Bagheri M. High-Resolution FBG-Based Fiber-Optic Sensor with Temperature Compensation for PD Monitoring. *Sensors*, 2019 (23), 5285. doi: <https://doi.org/10.3390/s19235285>

[2] Mikhailov P., Ualiyev Z., Kabdoldina A., Smailov N., Khikmetov A., Malikova F. Multifunctional fiber-optic sensors for space infrastructure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 2021 (5 (113)), 80–89. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242995>

[3] Song P., Ma Z., Ma J., Yang L., Wei J., Zhao Y., Zhang M., Yang F., Wang X. Recent Progress of Miniature MEMS Pressure Sensors. *Micromachines*, 2020, 11 (1), 56. doi: <https://doi.org/10.3390/mi11010056>

[4] Bai L., Zheng G., Sun B., Zhang X., Sheng Q., Han Y. High-precision optical fiber pressure sensor using frequency modulated continuous-wave laser interference. *AIP Advances*, 2021, 11 (2), 025038. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0035643>

[5] Королев В. А., Потапов В. Т. Волоконно-оптические датчики температуры и давления в биомедицине. *Вестник новых медицинских технологий том. XVIII*, 2011, 3, 256–258.

[6] Pevec S., Donlagic D. Miniature fiber-optic sensor for simultaneous measurement of pressure and refractive index. *Optics Letters*, 2014, 39 (21), 6221–6224. doi: <https://doi.org/10.1364/ol.39.006221>

[7] Mendoza E. A., Esterkin Y., Kempen C., Sun Z. Multi-channel monolithic integrated optic fiber Bragg grating sensor interrogator. *Photonic Sensors*, 2011, 1 (3), 281–288. doi: <https://doi.org/10.1007/s13320-011-0021-8>

[8] Zhou N., Jia P., Liu J., Ren Q., An G., Liang T., Xiong J. MEMS-Based Reflective Intensity-Modulated Fiber-Optic Sensor for Pressure Measurements. *Sensors*, 2020, 20 (8), 2233. doi: <https://doi.org/10.3390/s20082233>

[9] Цаплин А. И., Репин В. Н. Патент № 2269755 РУ. Волоконно-оптический датчик давления. МПК: G01J11/02. объявлен: 07.07.2004; опубликовано: 10.02.2006.

[10] Стоеш К.У., Бойд К.Д. Патент № 2473874 РУ. Распределенные оптические датчики давления и температуры. МПК: G01J11/02. объявлен: 29.06.2009; опубликовано: 27.01.2013.

[11] Mikhailov P., Ualiyev Z. Sensor stability assurance problems and their relationship with the overall problems of providing system performance quality. MATEC Web of Conferences, 2020, 329, 03032. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032903032>

[12] Тимошенко С.П., Бойко А.Н., Симонов Б.М. Методы сборки и монтажа макетных образцов микроэлектромеханических систем. Известия вузов. Электрон, 2010, 84, 58–63.

[13] Ozhikenov K., Mikhailov P., Kabdoldina A., Ualiyev Zh. The forming processes of local removal of semiconductor materials in micromechanical devices manufacturing technologies International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2018, 9 (10), 1356–1367.

[14] Андреев К.А., Власов А.И., Шахнов В.А. Кремниевые преобразователи давления с защиты от перегрузки. Датчики и системы, 2014, 10, 54–57.

[15] Синев Л. С. Особенности использования электростатических соединений кремния со стеклом в технологии микросистем. Инженерный вестник. МГТУ им. Н. Е. Бауман, 2014, 5, 501–509.

[16] Khandan O., Stark D., Chang Alexander., Rao M. P. Wafer-scale titanium anodic bonding for microfluidic applications. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 205, 244–248. doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.08.083>

[17] Ушков А. В., Козлов А. Н. Проектирование, производство и исследование кремниевых чувствительных элементов давления со встроенной защитой от перегрузки. Нано- и микросистемы. техн., 2007, 5, 49–51.

[18] Dragoi V., Pabo E., Burggraf J., Mittendorfer G. CMOS: compatible wafer bonding for MEMS and wafer-level 3D integration. Microsystem Technologies, 2012, 18 (7–8), 1065–1075. doi: <https://doi.org/10.1007/s00542-012-1439-7>

[19] Ran Z., He X., Rao Y., Sun D., Qin X., Zeng D. et al. Fiber-Optic Microstructure Sensors: A Review. Photonic Sensors, 2021, 11 (2), 227–261. doi: <https://doi.org/10.1007/s13320-021-0632-7>

[20] Михайлов П.Г. Моделирование влияния краевого электростатического эффекта на функцию преобразования тонкопленочных квазидифференциальных емкостных чувствительных элементов. Журнал физики: серия конференций, 2021, 2096 (1), 012143. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2096/1/012143>.

[21] Wang Y. Fiber-Optic Sensors for Fully-Distributed Physical, Chemical and Biological Measurement. 2012, Blacksburg. Available at: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/19222/Wang_Y_D_2013.pdf?sequence=1

[22] Bachin V. A. Diffuzionnaia svarka stekla i keramiki s metallami. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 184.

[23] Ouyang Y., Guo H., Ouyang X., Zhao Y., Zheng Z., Zhou C., Zhou A. An In-Fiber Dual Air-Cavity Fabry–Perot Interferometer for Simultaneous Measurement of Strain and Directional Bend. IEEE Sensors Journal, 2017(11), 3362–3366. doi: <https://doi.org/10.1109/jsen.2017.2693501>

[24] Pargfrieder S. et al. New low temperature bonding technologies for the MEMS Industry. The 6th Korean MEMS Conf. 2004.

[25] Yufeng J., Jiaxun Z. MEMS Vacuum Packaging Technology and Applications. 2005 6th International Conference on Electronic Packaging Technology, 2005. doi: <https://doi.org/10.1109/icept.2005.1564710>

[26] Чернов А.С., Самородов А.Л., Хабаров С.П., Гридчин В.А. Фоточувствительный элемент для сенсора давления с оптической пространственной модуляцией. Нано- и микросистемная техника, 2016, 18 (7), 416–423.

[27] Синев Л.С., Рябов В.Т. Согласование коэффициентов термического расширения при электростатическом соединении кремния со стеклом. Микро- и наносистемная техника, 2011, 5, 24–27.

REFERENCES*

[1] Ghorat M., Gharehpetian G. B., Latifi H., Hejazi M. A., Bagheri M. High-Resolution FBG-Based Fiber-Optic Sensor with Temperature Compensation for PD Monitoring. *Sensors*, 2019 (23), 5285. doi: <https://doi.org/10.3390/s19235285>

[2] Mikhailov P., Ualiyev Z., Kabdoldina A., Smailov N., Khikmetov A., Malikova F. Multifunctional fiber-optic sensors for space infrastructure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 2021 (5 (113)), 80–89. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242995>

[3] Song P., Ma Z., Ma J., Yang L., Wei J., Zhao Y., Zhang M., Yang F., Wang X. Recent Progress of Miniature MEMS Pressure Sensors. *Micromachines*, 2020, 11 (1), 56. doi: <https://doi.org/10.3390/mi11010056>

[4] Bai L., Zheng G., Sun B., Zhang X., Sheng Q., Han Y. High-precision optical fiber pressure sensor using frequency modulated continuous-wave laser interference. *AIP Advances*, 2021, 11 (2), 025038. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0035643>

[5] Korolev V. A., Potapov V. T. Volokonno-opticheskie datchiki temperatury i davleniya v biomedicine. *Vestnik novykh medicinskih tehnologij tom. XVIII*, 2011, 3, 256–258.

[6] Pevec S., Donlagic D. Miniature fiber-optic sensor for simultaneous measurement of pressure and refractive index. *Optics Letters*, 2014, 39 (21), 6221–6224. doi: <https://doi.org/10.1364/ol.39.006221>

[7] Mendoza E. A., Esterkin Y., Kempen C., Sun Z. Multi-channel monolithic integrated optic fiber Bragg grating sensor interrogator. *Photonic Sensors*, 2011, 1 (3), 281–288. doi: <https://doi.org/10.1007/s13320-011-0021-8>

[8] Zhou N., Jia P., Liu J., Ren Q., An G., Liang T., Xiong J. MEMS-Based Reflective Intensity-Modulated Fiber-Optic Sensor for Pressure Measurements. *Sensors*, 2020, 20 (8), 2233. doi: <https://doi.org/10.3390/s20082233>

[9] Caplin A. I., Repin V. N. Patent № 2269755 RU. Volokonno-opticheskiy datchik davleniya. MPK: G01L11/02. ob#javlen: 07.07.2004; opublikovano: 10.02.2006.

[10] Stoesh K.U., Boid K.D. Patent № 2473874 RU. Raspredelennye opticheskie datchiki davleniya i temperatury. MPK: G01L11/02. ob#javlen: 29.06.2009; opublikovano: 27.01.2013.

[11] Mikhailov P., Ualiyev Z. Sensor stability assurance problems and their relationship with the overall problems of providing system performance quality. *MATEC Web of Conferences*, 2020, 329, 03032. doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202032903032>

[12] Timoshenkov S.P., Bojko A.N., Simonov B.M. Metody sborki i montazha maketnyh obrazcov mikrojelektromehaničeskikh sistem. *Izvestija vuzov. Jelektron*, 2010, 84, 58–63.

[13] Ozhikenov K., Mikhailov P., Kabdoldina A., Ualiyev Zh. The forming processes of local removal of semiconductor materials in micromechanical devices manufacturing technologies *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, 9 (10), 1356–1367.

[14] Andreev K.A., Vlasov A.I., Shahnov V.A. Kremnievye preobrazovateli davleniya s zashhity ot peregruzki. *Datchiki i sistemy*, 2014, 10, 54–57.

[15] Sinev L. S. Osobennosti ispol'zovaniya jelektrostaticheskikh soedinenij kremnija so steklom v tehnologii mikrosistem. *Inzhenernyj vestnik. MGTU im. N. E. Bauman*, 2014, 5, 501–509.

[16] Khandan O., Stark D., Chang Alexander., Rao M. P. Wafer-scale titanium anodic bonding for microfluidic applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 205, 244–248. doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.08.083>

[17] Ushkov A. V., Kozlov A. N. Proektirovanie, proizvodstvo i issledovanie kremnievyyh chuvstvitel'nyh jelementov davlenija so vstroennoj zashhitoy ot peregruzki. *Nano- i mikrosistemy. tehn.*, 2007, 5, 49–51.

[18] Dragoi V., Pabo E., Burggraf J., Mittendorfer G. CMOS: compatible wafer bonding for MEMS and wafer-level 3D integration. *Microsystem Technologies*, 2012, 18 (7–8), 1065–1075. doi: <https://doi.org/10.1007/s00542-012-1439-7>

[19] Ran Z., He X., Rao Y., Sun D., Qin X., Zeng D. et al. Fiber-Optic Microstructure Sensors: A Review. *Photonic Sensors*, 2021, 11 (2), 227–261. doi: <https://doi.org/10.1007/s13320-021-0632-7>

[20] Mihajlov P.G. Modelirovanie vlijaniya kraevogo jelektrostaticheskogo jeffekta na funkciu preobrazovaniya tonkoplenochnyyh kvazidifferencial'nyh emkostnyh chuvstvitel'nyh jelementov. *Zhurnal fiziki: serija konferencij*, 2021, 2096 (1), 012143. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2096/1/012143>.

[21] Wang Y. *Fiber-Optic Sensors for Fully-Distributed Physical, Chemical and Biological Measurement*. 2012, Blacksburg. Available at: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/19222/Wang_Y_D_2013.pdf?sequence=1

[22] Bachin V. A. *Diffuzionnaya svarka stekla i keramiki s metallami*. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 184.

[23] Ouyang Y., Guo H., Ouyang X., Zhao Y., Zheng Z., Zhou C., Zhou A. An In-Fiber Dual Air-Cavity Fabry–Perot Interferometer for Simultaneous Measurement of Strain and Directional Bend. *IEEE Sensors Journal*, 2017(11), 3362–3366. doi: <https://doi.org/10.1109/jsen.2017.2693501>

[24] Pargfrieder S. et al. New low temperature bonding technologies for the MEMS Industry. *The 6th Korean MEMS Conf.* 2004.

[25] Yufeng J., Jiaxun Z. *MEMS Vacuum Packaging Technology and Applications*. 2005 6th International Conference on Electronic Packaging Technology, 2005. doi: <https://doi.org/10.1109/icept.2005.1564710>

[26] Chernov A.S., Samorodov A.L., Habarov S.P., Gridchin V.A. Fotochuvstvitel'nyj jelement dlja sensora davlenija s opticheskoy prostranstvennoj moduljaciej. *Nano- i mikrosistemnaya tehnika*, 2016, 18 (7), 416–423.

[27] Sinev L.S., Rjabov V.T. Soglasovanie kojefficientov termicheskogo rasshireniya pri jelektrostaticheskom soedinenii kremnija so steklom. *Mikro- i nanosistemnaya tehnika*, 2011, 5, 24–27.

Әсем Қабдолдина, PhD, Академик Ә.А. Джалдасбеков атындағы Механика және машина жасау институты, Алматы, Қазақстан, assemkabdoldina@gmail.com

Жомарт Уалиев, PhD, Академик Ә.А. Джалдасбеков атындағы Механика және машина жасау институты, Сандық техника және технологиялар институты, Алматы, Қазақстан, zh-u@mail.ru

Қанибек Сансызбай, PhD, Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан, k.sansizbay@alt.edu.kz

Назым Қабдолдина, магистр, аға оқытушы, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан, naz_82k@mail.ru

Алтынай Қыдырбаева, магистрант, Алматы технологиялық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан, mook@atu.kz

ЭКСТРЕМАЛДЫ ПАЙДАЛАНУ ЖАҒДАЙЛАРЫ ҮШІН ҚОЛДАНЫЛАТЫН АРАЛАС ТАЛШЫҚТЫ-ОПТИКАЛЫҚ СЕНСОРДЫҢ КОНСТРУКЦИЯСЫ МЕН ДАЙЫНДАУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа. Зерттеу объектілері болып біріктірілген талшықты-оптикалық сенсордың конструкциялары мен өндіріс технологиялары табылады. Ол экстремалды жұмыс жағдайында қолданылады. Мәселенің мәні бірнеше бір-біріне ұқсамайтын физикалық шамаларды бір уақытта өлшеуге арналған оптикалық және микромеханикалық принциптердің конструкциялық және технологиялық үйлесімділігін зерттеу. Осыған байланысты таңдалған модульдік түрлендіру принципі біріктірілген түрлендіру мәселесін шешеді. Әзірленген конструкция және электроадгезиялық қосылу технологиясы сенсордағы ішкі механикалық кернеулерді айтарлықтай азайтады және осылайша экстремалды жұмыс жағдайында біріктірілген сенсорлардың тұрақтылығын арттырады. Ішкі механикалық кернеулердің шамасы мен бағытын күрделі құрылымдар үшін уақытша тұрақтылық сипаттамаларымен байланыстыратын аналитикалық модельдер, әдетте, жоқ. Тәжірибеде алынған зерттеу нәтижелерін қысым мен температураның, қысым мен дірілдің және т.б. біріктірілген датчиктерге қолдануға болады.

Түйінді сөздер. Оптикалық талшық, сенсор, формация, электроадгезивті, байланыс, өрнек, тұрақтылық, функциялар комбинациясы.

Assem Kabdoldina, PhD, academician O. A. Joldasbekov Institute of mechanics and mechanical engineering, Almaty, Kazakhstan, assemkabdoldina@gmail.com

Zhomart Ualiyev, PhD, O. A. Joldasbekov Institute of mechanics and mechanical engineering, Institute of Digital Engineering and Technology, Almaty, Kazakhstan, zhu@mail.ru

Kanibek Sansyzbay, PhD, Academy of logistics and transport, Almaty, Kazakhstan, k.sansyzbay@alt.edu.kz

Nazym Kabdoldina, master, senior lecturer, Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan, naz_82k@mail.ru

Altynai Kydyrbayeva, master's student, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, mook@atu.kz

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES AND MANUFACTURE OF A COMBINED FOS USED FOR HARSH WORKING CONDITIONS

Abstract. The subject of the research is the design and manufacturing technology of composite FOS. They are used in extreme operating conditions. The essence of the problem is to study the design and technical compatibility of optical and micromechanical principles for the simultaneous measurement of several dissimilar physical quantities. In this regard, the chosen principle of modular conversion solves the problem of combined conversion. The developed design and electrical connection technology significantly reduce the internal mechanical stress of the sensor and increase the stability of the combined sensor under extreme operating conditions. Analytical models connecting the magnitude and orientation of internal mechanical stresses with the characteristics of temporary stability for complex structures are, as a rule, absent. In practice, the obtained research results can be applied to combined sensors of pressure and temperature, pressure and vibration, etc.

Keywords. optical fiber, sensor, formation, electrical connection, etching, stability, combination of functions.
