

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
МИРЭА – РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

«INTERMATIC–2018»

**Материалы Международной научно-технической
конференции «INTERMATIC – 2018»
19 – 23 ноября 2018 г., Москва**

Под редакцией
академика РАН А.С. Сигова

**Редакционно-издательский отдел РТУ МИРЭА
Москва, 2018**

© ИРЭ РАН, 2018
© РТУ МИРЭА, 2018

Об издании – [1](#), [2](#), [3](#), [4](#)

ISBN 978-5-7339-1488-6

[Содержание сборника INTERMATIC - 2018](#)

УДК 539.1: 621.315.5: 621.37: 621.382: 621.396

ББК 34.9

Ф94

Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения «INTERMATIC–2018» [Электронный ресурс]: материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC– 2018», 19–23 ноября 2018 г., Москва / МИРЭА – Росс. технол. ун-т; под ред. академика РАН А.С. Сигова. – Электрон. текстовые дан. (327 МБ). – М.: РТУ МИРЭА, 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: IBM PC; Internet Explorer, Acrobat Reader 6.0 или старше. – Загл. с экрана. – ISBN 978-5-7339-1488-6

В настоящий сборник включены материалы Международной НТК «INTERMATIC–2018», отражающие новые результаты научных и инженерных исследований в области прикладной физики твердого тела, наноструктур, физической электроники, радиоматериалов и технологий, радиоэлектронного приборостроения, информационных технологий и телекоммуникаций, проблем надежности и качества.

Сборник рассчитан на специалистов в области физической радиоэлектроники и технологии радиоэлектронного приборостроения. Он также может быть использован преподавателями, аспирантами и студентами при изучении соответствующих курсов.

В настоящий сборник также включены соответствующие теме материалы X Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения – 2018», 20 – 23 ноября 2018 г., Москва.

*Мероприятие проведено при финансовой поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований, Проекты № 18-02-20148, 18-32-10041*

Электронное научное издание

Минимальные системные требования:

Компьютер: процессор x86 с тактовой частотой 500 МГц и выше; ОЗУ 512 МБ;
видеокарта SVGA 1280×1024 High Color (32 bit); привод CD-ROM

Операционная система: Windows XP/7/8/10

Программное обеспечение: Internet Explorer версии 6 и выше;
Adobe Acrobat Reader версии 6 и выше

© Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 2018

© МИРЭА – Российский технологический университет, 2018

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ:

Министерство науки и высшего образования РФ
Российская Академия Наук
Научный совет РАН по физике конденсированных сред
Российский фонд фундаментальных исследований
Федеральное агентство связи
Институт радиотехники и электроники РАН
МИРЭА – Российский технологический университет
Московский технический университет связи и информатики

ПРИ УЧАСТИИ:

Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины
Научного исследовательского
Томского политехнического университета
Российской академии естественных наук
Журнала «Наноматериалы и наноструктуры – XXI век»
Журнала «Наукоемкие технологии»
Журнала «Радиотехника»

ОРГКОМИТЕТ:

Сигов А.С. – (Россия) – председатель,
Гуляев Ю.В. – (Россия) – зам. председателя,
Аджемов А.С. – (Россия) – зам. председателя,
Лучников А.П. – (Россия) – ученый секретарь,
Ерохин С.Д. – (Россия),
Камильджанов Б.И. – (Узбекистан),
Кудж С.А. – (Россия),
Никитов С.А. – (Россия),
Перно Ф. – (Франция),
Расинг Т. – (Нидерланды),
Рогачев А.В. – (Беларусь),
Скотт Д. – (Великобритания),
Федоров И.Б. – (Россия)

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ:

Белкин М.Е. – председатель,	Орлов В.Г. – ученый секретарь,
Аристов В.В.,	Багдасарян А.С.,
Васильев А.Г.,	Воротилов К.А.,
Захаров А.К.,	Каляев И.А.,
Капустин В.И.,	Крашенинников А.И.,
Лось В.П.,	Мишина Е.Д.,
Нефедов В.И.,	Попо Р.А.,
Рагуткин А.В.,	Санников В.Г.,
Сидорин В.В.,	Соколов В.В.,
Суржигов А.П.,	Трефилов Н.А.,
Шаврин С.С.	

FUNDAMENTAL PROBLEMS OF RADIOENGINEERING AND DEVICE CONSTRUCTION

«INTERMATIC–2018»

**Proceedings of the International Scientific
and Technical Conference «INTERMATIC – 2018»**

November 19 – 23, 2018, Moscow

Edited by A. Sigov

Редакционная коллегия :

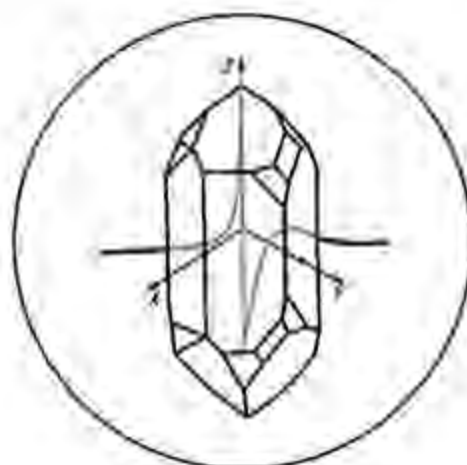
**Ю.В. Гуляев (председатель), А.С. Аджемов, К.А. Воротилов,
С.А. Кудж, П.А. Лучников, С.А. Никитов, В.Г. Орлов,
А.С. Сигов (ответственный редактор), Г.И. Сорокин**

Издание на 1 электронном оптическом диске (CD-ROM)
в тонком CD-боксе с вкладышем

Редакционно-издательский отдел РТУ МИРЭА
119454, Москва, Проспект Вернадского, д. 78, тел. +7 499 215-65-65

Подписано к использованию 15.11.2018 г.
Объем издания - 327 МБ
Тираж 250 экз.

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



INTERMATIC – 2018

Часть 1: Прикладная физика и наноструктуры

Часть 2: Материалы и технологии

Часть 3: Приборы и компоненты РЭА

Часть 4: Информационные технологии и телекоммуникации

Часть 5: Проблемы надежности и качества

Москва – 2018

Содержание сборника INTERMATIC – 2018, часть 3

Приборы и компоненты РЭА

1.	<u>Багдасарян А.С., Багдасарян С.А. Информационные технологии с использованием радиомониторинга в общей врачебной практике</u>	521
2.	<u>Багдасарян С.А. Радиочастотные компоненты на поверхностных акустических волнах с невзаимными СВЧ устройствами</u>	526
3.	<u>Алёшин А.В., Ключник Д.А., Смирнов Е.Е., Фофанов Д.А. Перестраиваемая радиофотонная линия передачи с умножением частоты для аппаратуры радиосвязи и радиолокации</u>	531
4.	<u>Гончаренко В.М., Марьин С.В., Калинин Д.К., Бочаров Н.А., Веретенников А.П. Антенна бегущей волны с уменьшенным уровнем боковых лепестков и простейшей технологией изготовления</u>	535
5.	<u>Матвеев В.М. Использование конечно-элементного моделирования при разработке кремниевых преобразователей давления</u>	539
6.	<u>Годовицын И.В., Суханов В.С., Гусев Д.В. Основные конструкционные принципы разработки высокотемпературного программируемого датчика давления</u>	544
7.	<u>Богаченков А.Н., Титов С.А. Оптимизация аппаратного модуля и программного обеспечения многоэлементного линзового акустического микроскопа</u>	548
8.	<u>Коваленко А.Н., Оводенко Г.Б., Ярлыков А.Д. Математическая модель экранированной микрополосковой линии</u>	552
9.	<u>Парамонов Ю.Н., Сурков С.В., Шульгин Б.А. Двухсекционная замедляющая система на цепочке связанных резонаторов для мощной лампы бегущей волны X-диапазона</u>	557
10.	<u>Скворцов Е.А., Симачков Д.С. Разработка, проектирование, изготовление и исследование генератора сигналов различной формы на логических элементах "не"</u>	561
11.	<u>Бартенев В.Г. Модельно-ориентированное проектирование генератора случайных чисел с распределением Гаусса</u>	565
12.	<u>Денисов В.Е. Анализ искажений непрерывного сигнала с ЛЧМ в фазовращателе</u>	571
13.	<u>Деменков Н.П., Чан Динь Минь Применение нечеткого фильтра Калмана к навигационной задаче в БИНС с волновыми твердотельными гироскопами</u>	576
14.	<u>Елизаров С.Г., Ключник Н.Т., Ленин М.М., Яковлев М.Я. Влияние комбинированных температурно-механических воздействий на характеристики двухволновых WDM-демультиплексоров</u>	582
15.	<u>Заикин А.М., Кирюхин И.С., Винников И.А. Автоматизированный комплекс для замера резистивных модулей</u>	586
16.	<u>Китаев А.Е. Моделирование процессов в транзисторных генераторах (на примере транзисторного аналога генератора Ван-дер-Поля)</u>	590
17.	<u>Петров В.А. Алгоритмы работы микросхем повышающе-понижающих DC-DC преобразователей с накачкой заряда</u>	594
18.	<u>Березин В.В., Щитов А.М., Чиликов А.А., Дюков Д.И., Чеченин Ю.И. Монолитные интегральные схемы широкополосных диодных умножителей частоты</u>	600

КВЧ-диапазона

19. [Семенюк А.В., Пермьяков Н.В., Мошников В.А. Установка с жидким точечным контактом для проведения электрических измерений](#) 604
20. [Савченко Е.М., Кузьмин А.Ю. Широкополосные сверхвысокочастотные усилители на основе биполярных и гетеробиполярных транзисторов](#) 608
21. [Березин В.В., Хамидулин С.В., Гусев И.Н., Прядилов А.В. Проектирование усилителей мощности дециметрового диапазона](#) 611
22. [Бабенко В.П., Битюков В.К. Схемотехника формирователей паузы задержки dead time в силовых ключах](#) 615
23. [Соловьев А.А., Индришенок В.И., Шнякин А.А. Измерения вольтамперных характеристик и определение параметров транзисторов в системе моделирования Keysight IC-CAP](#) 621
24. [Федулов Ф.А., Савельев Д.В., Чашин Д.В., Kettl W., Шамонин М., Фетисов Л.Ю. Установка для изучения магнитострикционных свойств магнитоактивных эластомеров](#) 625
25. [Исаков В.Н., Тимошенко П.И. Эффекты квантования коэффициентов в нерекурсивных цифровых фильтрах с п-образной амплитудно-частотной характеристикой](#) 628
26. [Ковалев М.И., Ковалева А.М., Ищенко А.И., Мурашко А.В., Ванин А.Ф., Ткачев Н.А., Комиссарова Л.Х., Марнаутков Н.А., Вознесенский В.И., Поминальная В.М., Сереженков В.А. Возможности диагностики рака шейки матки методом электронного парамагнитного резонанса \(ЭПР\)](#) 632
27. [Васильева К.А., Горшков А.Г. Вопросы разработки приемно-передающего модуля для ультразвукового медицинского диагностического устройства](#) 634
28. [Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Реализация редактора радиосцены на системном уровне проектирования в разрабатываемой отечественной САПР РЛС](#) 638
29. [Багдасарян А.С., Синицына Т.В., Груздев А.С. Прецизионные контактные устройства для контроля частотных характеристик устройств на ПАВ](#) 642
30. [Багдасарян А.С., Белянин А.Ф., Багдасарян С.А. Эндоскоп направленного импульсного рентгеновского излучения](#) 646
31. [Адамович Е.Д., Градов О.В., Насиров Ф.А. Жидкометаллическая микрофлюидика с морфометрическим корреляционно-спектральным контролем среды: от жидкометаллической антенны до радиочастотной осциллополюрографии](#) 650
32. [Крюков Д.А., Скворцов Е.А., Симачков Д.С. Проектирование, изготовление и исследование устройства «Лестница Иакова с движущейся плазмой»](#) 654
33. [Шипаева А.С. Сравнительный анализ фильтров подавления колебаний стенок сердца и сосудов в режиме цветового доплеровского картирования ультразвукового медицинского диагностического устройства](#) 658
34. [Пичугин Н.К. Определение параметров приемного и передающего тракта при работе преобразователями с сухим точечным контактом для поверхностного прозвучивания материалов](#) 663
35. [Титов С.А., Богаченков А.Н. Особенности интерпретации пространственно-временного сигнала в линзовом акустическом микроскопе с двумерной решеткой](#) 667
36. [Алыков А.Н., Булаев И.Ю., Кулибаба А.Я. Отбраковка танталовых конденсаторов для комплектования высоконадежной аппаратуры](#) 671

37.	<u>Клюев А.В. Флуктуации в электромеханических 3D дисплеях</u>	675
38.	<u>Бутов О.В., Веснин В.Л., Низаметдинов А.М., Черторийский А.А. Волоконно-оптический аналог болометрического датчика СВЧ излучения</u>	679
39.	<u>Малохатко С.В., Гусев Е.Ю. Моделирование резонансных частот поликремниевого кантилевера для многочастотной атомно-силовой микроскопии</u>	683
40.	<u>Лерер А.М., Головачева Е.В., Грибникова Е.И., Иванова И.Н., Ячменов А.А. Исследование поглощающих дифракционных решеток</u>	687
41.	<u>Николаев К.О., Шамин А.А., Печерская Е.А., Зинченко Т.О. Способы воздействия на эффективность оксидных солнечных элементов</u>	691
42.	<u>Черников А.С., Хорьков К.С., Кочуев Д.А., Чкалов Р.В. Исследования влияния режимов записи и параметров образованных оптических структур в кварцевом волокне на его спектральные характеристики</u>	695
43.	<u>Коржавина А.С. Метод и устройство преобразования вещественных чисел стандартных форматов в интервально-логарифмическое представление</u>	699
44.	<u>Клюев С.Б., Нагорнов А.Д., Нефёдов Е.И. Численный анализ рёберно-диэлектрической линии передачи с L-образными рёбрами</u>	703
45.	<u>Пономарев С.Г., Сидорцова О.Л., Кормилицин М.Н. Керамические поглотители СВЧ энергии, на основе алюминиево-магниево-шпинели</u>	705
46.	<u>Антипенский Р.В., Донцов А.А., Назаров Е.Е. Обоснование требований к пространственно-распределенной системе РТР бортовых РЛС с произвольным количеством постов и их структурой</u>	709
47.	<u>Швец В.А., Азаров И.А., Марин Д.Г., Рыхлицкий С.В., Якушев М.В. Бесконтактный эллипсометрический метод измерения температуры роста низкотемпературных процессов МЛЭ</u>	713
48.	<u>Ланин В.Л., Хацкевич А.Д. Микроконтроллерное управление термопрофилями индукционной пайки</u>	717
49.	<u>Слаповский Д.Н., Павлов А.Ю., Павлов В.Ю., Клековкин А.В., Майтама М.В. Сравнение статических характеристик HEMT AlGaIn/GaN, изготовленных по технологиям сплавных и несплавных омических контактов</u>	721
50.	<u>Низаметдинов А.М., Борисов Ю.С. Применение температурной и токовой перестройки длины волны излучения полупроводниковых лазеров в системах обработки сигналов волоконно-оптических брэгговских датчиков</u>	725
51.	<u>Сараев А.А., Аверин И.А., Карманов А.А., Пронин И.А. Моделирование сенсорного отклика датчиков вакуума с чувствительными элементами на основе металлооксидов в приближении фрактала Виттена-Сэндера</u>	729
52.	<u>Черевко А.Г., Моргачев Ю.В., Котин И.А., Якимчук Е.А., Соотс Р.А., Антонова И.В. Графеновая антенна на биоразлагаемой подложке для частотного диапазона GSM-1800</u>	734
53.	<u>Ермаков Д.С. Разработка ревизионного счетчика банковских карт</u>	738
54.	<u>Самохин С.А., Горюнов И.В., Иовдальский В.А. Малошумящий генератор 10-см диапазона на коаксиальном резонаторе с ФАПЧ</u>	741
55.	<u>Удалов А.И., Жуков Р.В. Изменение эксплуатационной емкости литий-ионных аккумуляторов</u>	745
56.	<u>Григорьев Л.В., Морозов И.С., Журавлев Н.В., Михайлов А.В. УФ фотоприемник на структуре ZnS-ZnO-сегнетоэлектрик с ПАВ</u>	750
57.	<u>Гаврилов С.А., Нукраев А.Н., Петренко Н.Ю. Влияние состава плазмообразующей среды на температурные поля оболочек разрядных приборов</u>	754

58.	<u>Дробнов А.П., Пермяков Н.В., Мошников В.А.</u> Автоматизированная термозондовая установка для оценки отклонения от стехиометрии собственных электрически активных дефектов (концентрации носителей заряда) халькогенидов элементов IV группы	758
59.	<u>Борисов Ю.С., Черторийский А.А.</u> Экспериментальное исследование многоканального дозиметра при работе с различными источниками ионизирующего излучения	762
60.	<u>Кислицин М.В., Ушаков П.А.</u> RC-элемент с распределенными параметрами для создания элементов с фрактальным импедансом	766
61.	<u>Балыко И.А., Иовдальский В.А., Терешкин Е.В.</u> Проектирование генераторов управляемых напряжением на полупроводниковых приборах СВЧ	770
62.	<u>Болховская О.В., Мальцев А.А., Сергеев В.А.</u> Оценивание волнового фронта и обнаружение сигналов в многоэлементных антенных решетках	775
63.	<u>Берикашвили В.Ш., Гайнулин К.Х.</u> Повышение разрешения биполярного АЦП	780
64.	<u>Шустов А.Л., Шлейтанова Н.А., Логинов А.Ю., Придачкин Д.Г.</u> Реализация обработки прерываний RISC микропроцессора	783
65.	<u>Логинов А.Ю., Головина Е.С., Шустов А.Л., Придачкин Д.Г.</u> Периферийный контроллер однокристалльной ЭВМ	787
66.	<u>Подласкин Б.Г., Гук Е.Г., Оболенсков А.Г., Сухарев А.А.</u> Согласование параметров подвижной апертуры ПЧД мультискан и оптического сигнала для повышения координатной чувствительности датчика	791
67.	<u>Зверев М.М., Гамов Н.А., Жданова Е.В., Студенов В.Б., Гладышев Н.И., Локтионов Д.Е., Курешов В.А., Мазалов А.В., Сабитов Д.Р., Падалица А.А., Мармалюк А.А.</u> Ультрафиолетовый излучатель на основе структуры AlGaIn/GaN с электронно-лучевой и оптической накачкой	795
68.	<u>Рахматулин А.Ш., Попов В.Д.</u> Разработка и исследование многоосевого акселерометра на основе GaAs/InAs	799
69.	<u>Савченко Е.М., Пронин А.А., Першин А.Д., Кузьмин А.Ю.</u> Особенности применения СВЧ усилителей средней мощности в импульсном режиме работы	803
70.	<u>Дудников С.Ю., Ухов А.А., Шаповалов С.В., Стеблевская И., Ли Р.В.</u> Беспроводной датчик температуры и влажности с передачей данных посредством технологии радиочастотной идентификации	807
71.	<u>Иванюшкин Р.Ю., Севериненко А.А.</u> Экспериментальное исследование амплитудно-фазовой конверсии радиочастотного усилителя мощности на полевом транзисторе	811
72.	<u>Васнев Н.А., Тригуб М.В.</u> Способы согласования импульсно-периодических режимов работы двух лазерных активных элементов	815
73.	<u>Герасимов В.А., Селиванов Л.М., Симон В.А.</u> Умный дверной замок с беспроводным двухдиапазонным управлением	820
74.	<u>Андрюшин К.П., Садыков Х.А., Андрюшина И.Н., Глазунова Е.В., Макарьев А.И.</u> Разработка измерительного комплекса для исследования реверсивной нелинейности сегнетопьезокерамических материалов на базе LCR-meter фирмы Agilent	824
75.	<u>Тригуб М.В., Власов В.В., Васнев Н.А.</u> Лазерные мониторы для дистанционной визуализации объектов и процессов	827
76.	<u>Власов В.В., Тригуб М.В.</u> Полупроводниковый источник накачки усилителя яркости на парах металлов с частотой следования импульсов до 100 кГц	831
77.	<u>Пирог В.П., Кондратьев И.А., Шахматов А.А., Носенко Л.Ф., Лучников П.А.</u>	835

- Назаренко А.А. Дальский А.А.** Измеритель влаги и кислорода в природном газе
78. **Плешанов И.М., Шеримов Д.Д.** Исследование микрофлюидных устройств для сенсорных применений 839
79. **Алексеев Ю.В., Шилов И.П., Иванов А.В., Рябов А.С., Румянцева В.Д., Горшкова А.С.** Портативное устройство для экспресс-исследований фармакодинамики иттербиевых комплексов порфиринов в биотканях 842

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КРЕМНИЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

© 2018 г. В.М. МАТВЕЕВ

НПК "Технологический центр", г. Зеленоград, г. Москва

Введение

Конечно-элементное моделирование основано на численном решении системы нелинейных уравнений, которая описывает модель исследуемого объекта, а также приложенные граничные условия и внешние воздействия [1,2]. Так как даже для относительно простой модели система уравнения может состоять из нескольких десятков тысяч уравнений, эффективность использования конечно-элементного моделирования зависит от имеющихся вычислительных мощностей. В связи с этим, широкое распространение конечно-элементное моделирование получил только в последние десятилетия, когда вычислительная мощность компьютеров даже офисной конфигурации стала достаточно высокой. Основное преимущество конечно-элементного моделирования состоит в том, что оно позволяет провести разработку конструкции изделия без существенных материальных затрат [3,4]. Также, несомненным достоинством конечно-элементного моделирования является возможность использования экспериментальных результатов с целью повышения точности расчета.

Цель работы

Рассмотреть особенности конечно-элементного моделирования кремниевых преобразователей давления. Описать подходы, применяемые для уменьшения размера модели преобразователя с целью ее оптимизации.

Методы решения

В основе конечно-элементного моделирования лежит разбиение модели объекта на элементы, размер которых значительно меньше самого объекта. Каждый элемент имеет связь с соседними элементами и испытывает воздействие с их стороны. Также элементы испытывают воздействие нагрузки. Для каждого элемента можно составить уравнение равновесия относительно какой-либо физической величины (сила, ускорение, температура, давление и т.д.). Это уравнение будет иметь N неизвестных, где N - количество элементов, на которое разбит объект. Большинство коэффициентов в этом уравнении равны нулю, так как каждый элемент связан не со всеми оставшимися элементами, а только с ближайшими соседями. Вся модель будет описываться системой из N уравнений с N неизвестными. Данную систему уравнений можно представить в следующем виде:

$$\{K\} \cdot \{X\} = \{B\}, \quad (1)$$

где $\{K\}$ – матрица коэффициентов связи, так называемая "матрица жесткости", $\{X\}$ – вектор неизвестных, $\{B\}$ – вектор граничных условий.

Решение системы уравнений (1) достигается путем умножения вектора граничных условий на матрицу, обратную матрице K :

$$\{X\} = \{B\} \cdot \{K\}^{-1}. \quad (2)$$

Использование конечно-элементного моделирования позволяет эффективно решать проблемы разработки кремниевых преобразователей давления без существенных временных и материальных затрат. При разработке очень важно найти баланс между точностью получаемых результатов и временными затратами. Время моделирования напрямую зависит от компьютерных ресурсов, находящихся в распоряжении разработчика. Очень часто для моделирования используется настольный компьютер офисной конфигурации. Точность расчета определяется степенью детализации модели, то есть количеством элементов, поэтому для получения достоверных результатов необходимо их увеличение до максимально возможного. Однако, увеличение количества элементов приводит к увеличению времени расчета, причем эта зависимость имеет нелинейный, близкий к экспоненциальному характер. Получение удовлетворительной точности результатов за приемлемое время моделирования возможно путем оптимизации процесса конечно-элементного моделирования, то есть создания модели, имеющей наименьшее количество элементов и обеспечивающей удовлетворительную точность расчета.

Структура кремниевых преобразователей давления имеет ряд существенных особенностей, обусловленных как характеристиками используемых материалов, так и технологическими подходами, применяемыми при изготовлении [5,6]. С точки зрения конструкции, структура кремниевых преобразователей давления имеет основные (мембрана, рамка, тензорезисторы) и вспомогательные (токоведущие дорожки, контактные площадки) элементы (рис. 1).

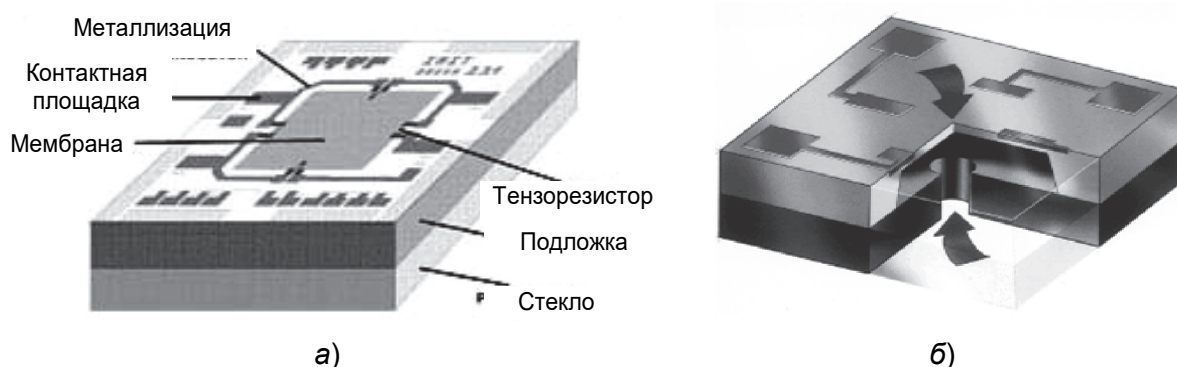


Рис. 1. Структура чувствительного элемента кремниевых преобразователей давления. а) общий вид б) разрез.

В большинстве случаев структура чувствительного элемента симметрична как минимум, по одной плоскости, а нередко и по двум. Это позволяет эффективно уменьшить размер модели кремниевых преобразователей давления путем отбрасывания половины или трех четвертей модели и проводить расчет модели не полного чувствительного элемента, а половины или четверти. Тем самым размер модели существенно уменьшается. Влияние отброшенной части модели заменяется граничными условиями, в качестве которых используются условия симметрии. Как результат, время расчета уменьшается, что снижает требования к мощности вычислительного оборудования.

Использование элементов различного размера для описания разных компонентов структуры служит другим, не менее эффективным подходом, с помощью которого можно уменьшить размер модели чувствительного элемента. Обычно наибольший интерес вызывают физические процессы, происходящие в наиболее важных компонентах структуры – для чувствительного элемента кремниевых преобразователей давления это тензорезисторы. Увеличение количества элементов, то есть уменьшение размера элемента, для тензорезисторов позволяет получить детальную информацию. Компоненты структуры, не представляющие интереса, могут быть описаны меньшим количеством элементов. В табл. 1 приведены параметры материалов, задаваемые в модели кремниевых преобразователей давления.

Таблица 1

Параметры материалов, задаваемые в модели
кристалла чувствительного элемента

№ пп	Материал	Параметры материала
1	Монокристаллический кремний легированный (тензорезисторы и шины разводки)	– матрица коэффициентов упругости – матрица тензорезистивных коэффициентов – объемное сопротивление – коэффициент теплового расширения
2	Монокристаллический кремний нелегированный (структурный)	– матрица коэффициентов упругости – коэффициент теплового расширения
3	Диэлектрические слои	– модуль Юнга – коэффициент Пуассона – коэффициент теплового расширения
4	Металлизация	– модуль Юнга – коэффициент Пуассона – коэффициент теплового расширения

Описанные выше подходы использованы при оптимизации модели кремниевого тензорезистивного преобразователя давления (рис. 2). Модель имеет компоненты с разными характерными размерами – от 1 мкм (тензорезисторы) до 400 мкм (подложка). При использовании для всей модели элемента с размером 1 мкм ее размер будет очень велик и расчет на обычном компьютере окажется невозможен. Поэтому используются оба подхода к уменьшению размера модели – разбиение на части по плоскостям симметрии и применение элементов разного размера для разных компонентов структуры.

При расчете характеристик кремниевого преобразователя давления в качестве граничных условий выступают следующие физические величины:

- а) Жесткое закрепление плоскости основания чувствительного элемента. Данное граничное условие обеспечивает связь кристалла с корпусом, в который помещен чувствительный элемент.
- б) Граничные условия, отражающие симметрию кристалла чувствительного элемента. Данные условия обычно представляют собой разрешение на скольжение точек модели в одной плоскости и запрет на перемещение в двух других плоскостях. Таким образом реализуется воздействие отсутствующей части структуры на трехмерную модель.
- в) Температурные граничные условия. Обеспечивают влияние температурного расширения материалов на параметры кристалла чувствительного элемента. Температурные граничные условия задаются в двумя величинами – опорной температурой, при которой механические напряжения в модели равны нулю, и заданной температурой расчета.
- г) Электрические граничные условия. Реализуются путем подачи напряжения на торцы тензорезисторов или низкоомных шин разводки. Величина напряжения может быть любой, так как результатом расчета является отношение между величиной напряжения и током через тензорезистор, т.е. сопротивление тензорезистора. Приемлемой величиной напряжения является 5 В. При этом не учитывается тепловое выделение в тензорезисторах вследствие протекания тока.
- д) Внешняя нагрузка. Внешней нагрузкой для кристалла чувствительного элемента преобразователя давления является равномерное давление, прикладываемое к рабочей плоскости кристалла. В результате приложения давления происходит

деформация упругого элемента мембранно-балочного типа, который обеспечивает изменение сопротивления тензорезисторов.

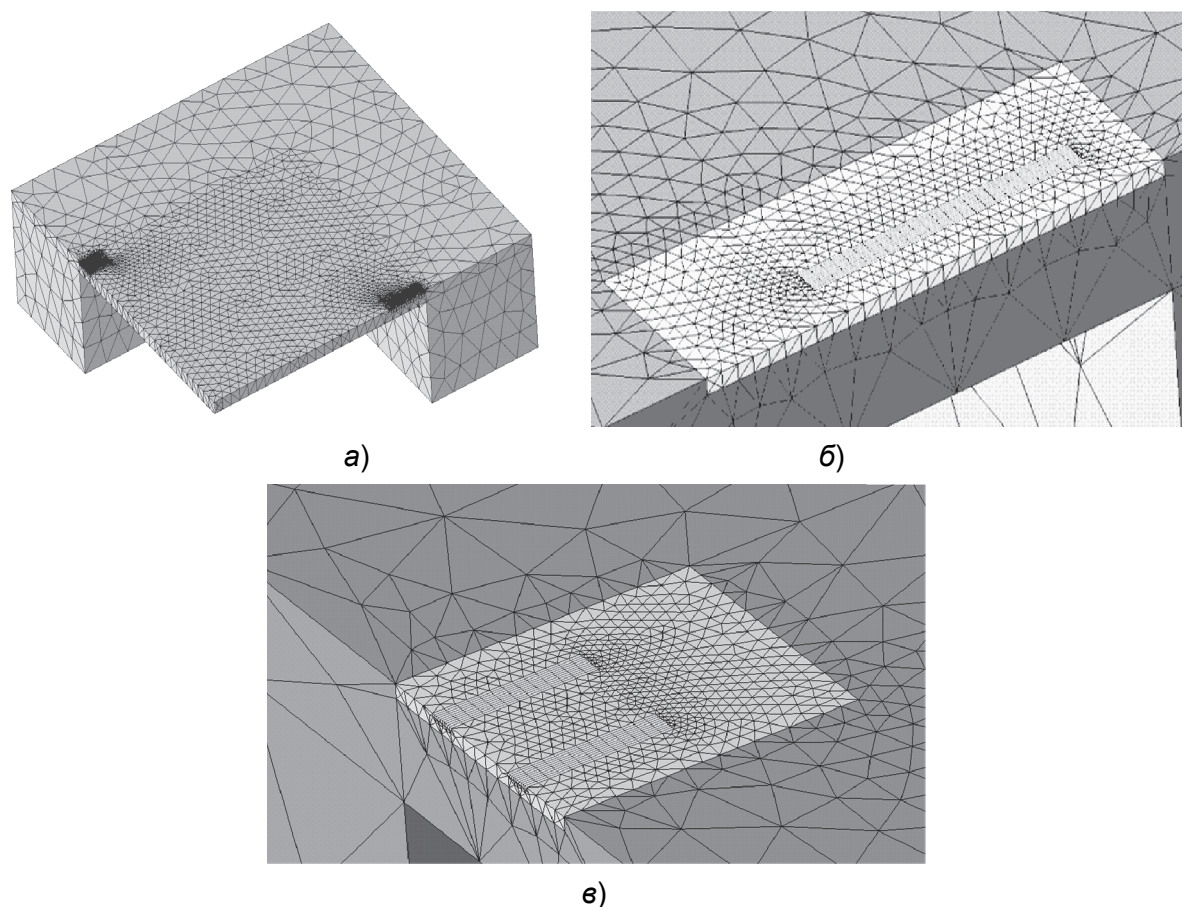


Рис. 2. Модель преобразователя давления после построения сетки.
а) общий вид; б) радиальный тензорезистор; в) тангенциальный тензорезистор.

Расчет основных характеристик кремниевого преобразователя давления может быть проведен с помощью программы конечно-элементного моделирования ANSYS, которая дает возможность расчета тензорезистивных эффектов с учетом анизотропии тензорезистивных и упругих свойств материала [7]. С помощью программы может быть рассчитана зависимость сопротивления тензорезисторов от давления и температуры и построена выходная характеристика с учетом того, что тензорезисторы объединены в полную мостовую схему, которая может быть использована для расчета метрологических характеристик преобразователя с использованием методик и соотношений, описанных в [8].

Заключение

Разработанная модель имеет около 30 тыс. элементов. По оценке, расчет одной точки выходной характеристики на компьютере офисной конфигурации будет занимать 2-3 минуты. Это время является приемлемым, так как позволяет выполнять значительный объем расчетов за относительно небольшой временной промежуток.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение № 14.577.21.0245, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57717X0245).

В работе использовалось оборудование ЦКП "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" (ЦКП НПК "Технологический центр").

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обзор современных систем автоматизированного проектирования: рыцари физики эфира – научная библиотека по физике и новым технологиям [электронный ресурс] ULD: <http://www.bourabai.ru/graphics/dir.htm> (дата обращения: 01.12.2017).
2. Introduction to Finite Element Methods: Department of Aerospace Engineering Sciences University of Colorado at Boulder [электронный ресурс] ULD: <http://www.colorado.edu/engineering/cas/courses.d/IFEM.d/> (дата обращения: 01.12.2017).
3. *Годовицын И.В.*, Расчет деформации электростатических ВЧ-переключателей аналитическим и конечно-элементным методами // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 11. С.41-46.
4. *Годовицын И.В., Амеличев В.В., Ильков А.В., Костромин А.Ю.* Моделирование микродвигателя на основе КНИ-структуры // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2012. № 1(93). С.43-47.
5. *Данилова Н.Л., Панков В.В., Суханов В.С., Михайлов Ю.А.* Интегральный преобразователь давления // Патент РФ №2362132. 2009.
6. *Игнатьева Е.В., Михайлов Ю.А.* О показателе чувствительности конструкции кремниевых тензопреобразователей давления, Датчики и системы. 2008. №10, С. 35 –38.
7. Официальный сайт компании ANSYS [электронный ресурс] ULD: www.ansys.com (дата обращения: 01.12.2017).
8. *Ваганов В.И.* Интегральные тензопреобразователи. - М.: Энергоатомиздат, 1983., 136 с.

ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОГРАММИРУЕМОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

© 2018 г. И.В. ГОДОВИЦЫН, В.С. СУХАНОВ, Д.В. ГУСЕВ

НПК "Технологический центр", г. Зеленоград, г. Москва

Введение

Измерение давления при высокой температуре – одна из наиболее насущных задач, стоящих в нефтегазовой отрасли, нефтехимической промышленности (изготовление пластмассовых изделий), космическом транспорте [1-2]. При решении данной задачи выбор чаще всего делается в пользу высокотемпературных кремниевых преобразователей давления, которые позволяют использовать возможности групповой технологии и тем самым существенно снизить себестоимость изготовления и одновременно обеспечить высокие метрологические характеристики. В последнее десятилетие в связи с развитием электронных средств обработки и передачи информации преобразователи давления снабжаются электронными блоками, выдающими показания в стандартном цифровом формате. Такой блок не может находиться при той же температуре, что и преобразователь, так как включает интегральные схемы, предельная температура функционирования которых не превышает 150 °С, в то время как преобразователь может находиться под воздействием температуры выше 500 °С [3].

Цель работы

Проведение разработки конструкции высокотемпературного программируемого датчика давления на основе преобразователя давления на КНИ-структуре.

Методы решения

Реализация высокотемпературного преобразователя давления требует решения целого ряда конструкционных и технологических задач:

- создание высокотемпературного чувствительного элемента;
- создание высокотемпературного корпуса;
- создание механического соединения высокотемпературного преобразователя давления с высокотемпературным корпусом;
- создание электрического соединения преобразователя давления и выводов корпуса, стойкого к высокой температуре;
- создание жидкостного наполнения преобразователя (при необходимости использования в агрессивных средах).

Электронный блок преобразователя давления выполняет функцию обработки сигнала путем внесения температурной и других коррекций. Так как он не может находиться при температуре свыше 150 °С, то возникает дополнительная задача разнесения высокотемпературного преобразователя и схемы обработки сигнала и их соединения специальным кабелем, который одним концом находится в высокотемпературной зоне, а другим в низкотемпературной.

КНИ-структура (кремния на изоляторе) обладает целым рядом важных достоинств, позволяющих решать наиболее сложную задачу – разработку и изготовление высокотемпературного ЧЭ. КНИ-структуры формируются с помощью спекания двух окисленных кремниевых пластин и шлифовки одной из них до требуемой толщины (bonded SOI), и широко используются как исходный материал для формирования

МЭМС-приборов [4] и, в частности, преобразователей давления. Отличная изоляция тензорезисторов, обеспеченная толстым диэлектрическим слоем, позволяет реализовывать высокотемпературные преобразователи давления.

Эскиз конструкции ЧЭ высокотемпературного преобразователя давления приведен на рис. 1. В качестве основы использована конструкция ЧЭ, используемого в датчиках давления серии ИПД5. ЧЭ состоит из 3х частей: основания, спейсера и кристалла мембраны. Кристалл мембраны формируется из КНИ-пластины. Основание обеспечивает крепление кристалла мембраны к корпусу. Спейсер соединяет основание и кристалл мембраны. Тензорезисторы расположены в местах концентрации механических напряжений на кристалле мембраны. Кристалл мембраны непосредственно осуществляет преобразование давления в выходное напряжение. Части кристалла преобразователя соединены между собой легкоплавким стеклом.

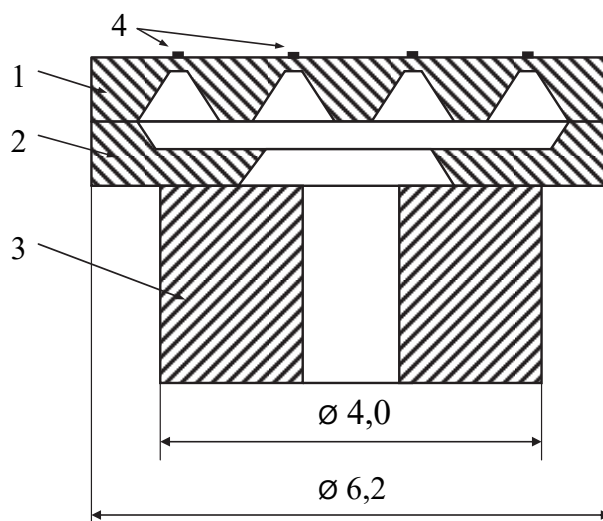


Рис. 1. Эскиз конструкции ЧЭ высокотемпературного преобразователя давления.

1 – кристалл мембраны на КНИ-пластине; 2 – спейсер; 3 – основание; 4 – тензорезисторы.

Предложенная конструкция ЧЭ высокотемпературного преобразователя давления имеет ряд характерных особенностей. В частности, кристалл мембраны имеет сложно-профилированную форму, которая образуется в результате глубокого анизотропного жидкостного травления кремния. Сформированные пирамидки из монокристаллического кремния обеспечивают достижение максимального уровня механических напряжений в заданных точках мембраны. Расчет характеристик ЧЭ с такой мембраной представляет сложную задачу. Наиболее эффективным подходом является использование конечно-элементного моделирования, которое позволяет учесть детали геометрии преобразователя, а также анизотропию тензорезистивных и упругих свойств монокристаллического кремния.

Сформированный ЧЭ размещается в корпусе, который должен удовлетворять требованиям стойкости к высокой температуре (более 150 °С). В наибольшей степени для этого подходят металlostеклянные цилиндрические корпуса типа ТО-5, которые позволяют легко интегрировать в конструкцию штуцера для подачи давления, как со стороны основания, так и со стороны крышки. Это позволяет варьировать конструкцию преобразователя путем изменения стороны мембраны, на которую подается давление. В России большой ассортимент корпусов ТО-5 производится на заводе "Марс" (г. Торжок). Данные корпуса выдерживают температуру более 300 °С.

Монтаж ЧЭ в корпус типа ТО-5 может осуществляться несколькими способами. В качестве одного из них может быть названа пайка на эвтектический припой. Эвтектическая пайка обеспечивает прочное соединение ЧЭ с корпусом, которое одновременно обладает высокой теплопроводностью, что позволяет эффективно отводить тепло от ЧЭ. В то же время высокая жесткость соединения через эвтектическую пайку может

внести дополнительные механические напряжения в ЧЭ при изменении температуры и тем самым ухудшить характеристики преобразователя.

Наиболее приемлемым подходом для решения проблемы посадки ЧЭ в корпус представляется использование высокотемпературных силиконовых герметиков, таких как "Эласил" или "Эластосил". Данные герметики благодаря своему составу обладают свойством не только выдерживать достаточно высокую температуру (до 250 °С), но и сохраняют при повышенной температуре свои упругие свойства. Кроме того, технология посадки ЧЭ в корпус при использовании силиконового герметика существенно упрощается и удешевляется. В то же время выбор конкретной технологии посадки ЧЭ в корпус определяется разработчиком исходя из совокупности всех требований к конструкции и условий использования преобразователя.

Электрическое соединение ЧЭ с корпусом представляется другим важным технологическим узлом изготовления высокотемпературного преобразователя давления. Электрическое соединение должно обеспечивать не только контакт с минимальным сопротивлением, но и надежное механическое соединение во всем диапазоне рабочих температур. Кроме того, при разработке конструкции и технологии электрического соединения необходимо учитывать, что высокая температура приводит к ускорению электрохимических и эвтектических процессов в контактных соединениях, что через определенное время может привести к драматическому изменению их свойств [5,6]. В наибольшей степени для обеспечения электрического соединения в высокотемпературном датчике давления подходит металлургическая система "золото-золото". Использование золота для контактных площадок и электродных выводов традиционно для технологии интегральных микросхем. Металлургическая система "золото-золото" обладает наивысшей надежностью среди применяемых. Благодаря применению металла одного типа при воздействии повышенной температуры не образуется интерметаллических соединений, не происходит межкомпонентной коррозии и других процессов, ведущих к ухудшению контакта. При повышенной температуре и с течением времени прочность соединения металлургической системы "золото-золото" только увеличивается, поэтому даже недостаточно качественная сварка не приводит к выходу изделия из строя [6].

Разрабатываемый высокотемпературный программируемый датчик давления предназначен для измерения избыточного давления с верхним пределом измерения 1 атм.

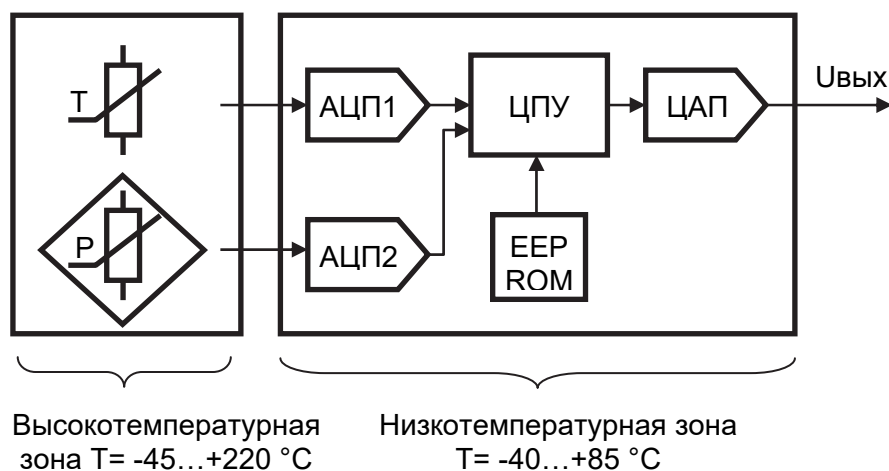


Рис. 2. Схема высокотемпературного программируемого датчика давления.

В высокотемпературной зоне располагается преобразователь давления, выполненный по кремниевой МЭМС-технологии и датчик температуры, в качестве которого используется интегральный резистор, расположенный в непосредственной близости от тензомоста (рис. 2).

Высокотемпературный преобразователь имеет следующие выходные сигналы: милливольтовый дифференциальный сигнал с тензомоста и однополярное напряже-

ние с датчика температуры. Эти выходные сигналы передаются по термостойкому проводу в низкотемпературную зону, где расположена схема обработки.

Схема обработки производит преобразование напряжения в цифровые значения разрядностью 12 бит. Коды поступают на вход вычислителя, который осуществляет цифровую коррекцию данных. Математическая обработка производится с помощью полинома 5й степени и осуществляет нормирование выходного сигнала преобразователя и компенсацию температурных зависимостей чувствительности и смещения нуля.

Полученный вычислителем код подается на ЦАП, который формирует напряжение унифицированного выхода 0-5 В.

Коэффициенты полинома определяются в процессе калибровки преобразователя и хранятся в постоянной памяти. Программируя эти коэффициенты, можно изменять вид передаточной характеристики преобразователя.

Заключение

Проведена разработка конструкции высокотемпературного программируемого датчика давления на основе преобразователя давления на КНИ-структуре. В качестве основы использована конструкция ЧЭ серийного преобразователя давления. ЧЭ состоит из 3х частей: основания, прокладки и кристалла мембраны. Рассмотрены особенности конструкции кристалла мембраны, имеющего сложную профилированную форму, которая формируется в результате глубокого анизотропного жидкостного травления кремния. Разработана схема обработки сигнала высокотемпературного преобразователя давления, производящая преобразование напряжения в цифровые значения разрядностью 12 бит, которые поступают на вход вычислителя, осуществляющего цифровую коррекцию данных. Входящий в состав схемы обработки ЦАП формирует напряжение унифицированного выхода от 0 до 5 В. В ППЗУ хранятся программные коэффициенты, с помощью которых можно изменять вид передаточной характеристики датчика.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение №14.577.21.0245, уникальный идентификатор ПРИЭР RFMEFI57717X0245).

При проведении работ использовалось оборудование ЦКП "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" (ЦКП НПК "Технологический центр").

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li S. et al, A novel SOI pressure sensor for high temperature application // 2015 J. Semicond. 36 014014.
2. Niu Z., Zhao Y., and Tian B. Design optimization of high pressure and high temperature piezoresistive pressure sensor for high sensitivity // Review Of Scientific Instruments 85, 015001 (2014).
3. Kurtz A.D., Ned A.A., and Epstein A.H., Ultra High Temperature Miniature SOI Sensors for Extreme Environments // IMAPS International HiTEC 2004 Conference Santa Fe, New Mexico, May 17-20, 2004.
4. Hofmann L., Dempwolf S., Reuter D., Ecke R., Gottfried K., Schulz S.E., Knechtel R., Geßner T., 3D integration approaches for MEMS and CMOS sensors based on a Cu through-silicon-via technology and wafer level bonding // Proceedings Volume 9517, Smart Sensors, Actuators, and MEMS VII; and Cyber Physical Systems; 951709 (2015); doi: 10.1117/12.2178598.
5. Gan C.L., Hashim U., Evolutions of bonding wires used in semiconductor electronics: perspective over 25 years // Journal of Materials Science: Materials in Electronics July 2015, Volume 26, Issue 7, pp. 4412–4424.
6. <http://eesemi.com/wirebond-metallurgies.htm> (дата обращения 31.01.2018).