

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

ISSN 1813-8586

Том 20. № 3. 2018

- Нанотехнологии
- Зондовая микроскопия
- Микромашины и наносистемы
- Молекулярная электроника
- Биоактивные нанотехнологии
- Элементы датчиков и биочипы
- Микроэлектромеханические системы
- Микрооптоэлектромеханические системы
- Биомикроэлектромеханические системы

NANO- and MICROSYSTEMS
TECHNOLOGY

Vol. 20, No. 3, 2018

The articles are published
in Russian and English



23 мая 2018 года, Москва

9-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ»

Приглашаем Вас принять участие в 9-й Международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ», которая состоится 23 мая 2018 года в Национальном Исследовательском Ядерном Университете МИФИ по адресу: г. Москва, Каширское шоссе, дом 31.

Тематика конференции:

- Фундаментальные аспекты наногетероструктурной СВЧ-электроники
- Полупроводниковые приборы и устройства: производство, технологии и свойства
- Гетероструктуры и сверхрешетки, двумерные, одномерные и нульмерные структуры
- Структурные свойства наносистем и гетероструктур
- Нанометрология в электронике
- Функциональная электроника и оптоэлектроника
- Образование в сфере современной электроники

Для участия необходимо пройти электронную регистрацию на сайте конференции на домене МИФИ:
<http://mokerov.mephi.ru/2018/index.html>

Извещение о конференции, форму анкеты участника конференции, правила и образец оформления тезисов вы сможете найти на сайте <http://www.mokerov.ru> в разделе КОНФЕРЕНЦИИ – 2018, а также на сайте конференции на домене МИФИ: <http://mokerov.mephi.ru/2018/index.html>

По всем вопросам проведения конференции обращаться в Оргкомитет:

- Васильевский Иван Сергеевич – тел.8-495-788-56-99, доб.81-78, E-mail: ivasilevskii@mail.ru;
- Мартиросова Галина Рафаиловна – тел.8-495-788-56-99, доб.84-53, E-mail: vgmokerov@yandex.ru;
- Виниченко Александр Николаевич – тел.8-495-788-56-99, доб.-82-37, E-mail: vanaxel@gmail.com.
- Хабибуллин Рустам Анварович – тел.8-499-123-44-64, E-mail: khabibullin@isvch.ru

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 20. № 3 ◆ 2018

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал включен в международные базы данных на платформе Web of Science: Chemical Abstracts Service (CAS), которая входит в Medline, и Russian Science Citation Index (RSCI).

Журнал индексируется в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и включен в международную базу INSPEC и в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по научным направлениям:

01.04.00 — физика, 05.27.00 — электроника, 02.00.00 — химические науки.

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук

Статьи имеют DOI и печатаются в журнале на русском и английском языках

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н., проф.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н., проф.
Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

Редакционный совет:

Аристов В. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН
Асеев А. Л., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН
Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН
Ковалчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН
Кульчин Ю. Н., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН
Лабунов В. А., д.т.н., проф., акад. НАНБ (Беларусь)
Рыжий В. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН
Сауров А. Н., д.т.н., проф., акад. РАН
Сигов А. С., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН
Чаплыгин Ю. А., д.т.н., проф., акад. РАН
Шевченко В. Я., д.х.н., проф., акад. РАН

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И., д.ф.-м.н., проф. (Беларусь)
Андреев А., к.ф.-м.н. (Великобритания)
Астахов М. В., д.х.н., проф.
Бакланов М. Р., д.х.н., проф. (Китай)
Басаев А. С., к.ф.-м.н.
Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф.
Горнев Е. С., д.т.н., проф.
Карякин А. А., д.х.н., проф.
Кузнецов В. И., д.т.н. (Нидерланды)
Леонович Г. И., д.т.н., проф.
Панин Г. Н., к.ф.-м.н., проф. (Южная Корея)
Панич А. Е., д.т.н., проф.
Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)
Рыжий М. В., д.т.н., проф. (Япония)
Сантос Э. Х. П., PhD, Ful. Prof. (Бразилия)
Сингх К., к.т.н. (Индия)
Телец В. А., д.т.н., проф.
Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н.
Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф.
Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)
Лысенко А. В. (отв. секретарь)
Григорин-Рябова Е. В.
Чугунова А. В.
Фокин В. А., к.х.н. (ред. перевода)
Щетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

Издается с 1999 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

- Смолин В. К. Методы формирования масок для взрывной литографии
131
Садков В. Д., Коршунова Е. Н. Моделирование процесса лазерной подгонки сопротивления пленочного резистора
141

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

- Акимов С. В., Афанасьев М. Я., Меткин Н. П., Федосов Ю. В. Оптимизация траектории лазерной обработки плоскостных заготовок для МЭМС
145
Тополов В. Ю., Исаева А. Н. Пьезочувствительность и факторы анизотропии бессвинцового 1—0—3-композита на основе кристалла (K, Na)(Nb, Ta)O₃
157

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Хмельницкий И. К., Алексеев Н. И., Брайко А. П., Каленов В. Е., Корляков А. В., Лагош А. В., Лившиц А. О., Лучинин В. В. Электромеханические преобразователи на основе ионных полимер-полимерных композитов
167
Дао Динь Ха, Стемпицкий В. Р. Исследование характеристик датчика Холла с различной геометрией активной области
174
Кешаварздинкова К. Н., Лукичев В. Ф., Кальнов В. А., Певцов Е. Ф. Сравнительная оценка частотных характеристик AlN и ЦТС, применяемых в качестве резонатора в вибрационных кольцевых гироскопах
186

Аннотации и статьи на русском и английском языках доступны на сайте журнала (<http://microsystems.ru>; <http://novtex.ru/nmst/>) в разделе "Архив статей с 1999 г.".

ПОДПИСКА:

по каталогу Роспечати (индекс 79493);
по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)
в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

Адрес для переписки:

107076 Москва,
Стромынский пер., д. 4
e-mail: nmst@novtex.ru

Учредитель:
Издательство "Новые технологии"

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 20
No. 3
2018

CHIEF EDITOR

Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Shur M. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (USA)

The Journal is included in the international databases of the chemical sciences — Chemical Abstracts Service (CAS) and of the engineering sciences — INSPEC, and it is also indexed in the Russian Science Citation Index (RSCI) based on the Web of Science platform. The Journal is included in the Russian System of Science Citation Index and the List of Journals of the Higher Attestation Commission of Russia. Its articles have DOI and are printed in the Journal in Russian and English languages. The Journal is published under the scientific-methodical guidance of the Branch of Nanotechnologies and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences.

CONTENTS

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

- Smolin V. K.** Methods to Create Masks for Explosive Lithography 136
Sadkov V. D., Korshunova E. N. Process Modeling of Laser Trimming of Resistance of the Film Resistor 143

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

- Akimov S. V., Afanasyev M. Yu., Metkin N. P., Fedosov Yu. V.** Optimization of the Laser Processing Trajectory for the Planar MEMS Dies 152
Topolov V. Yu., Isaeva A. N. Piezoelectric Sensitivity and Anisotropy Factors of the Lead-free 1—0—3 Composite Based on (K, Na)(Nb, Ta)O₃ Single Crystal 163

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

- Khmelnitskiy I. K., Alekseyev N. I., Broyko A. P., Kalyonov V. E., Korlyakov A. V., Lagosh A. V., Livshitz A. O., Luchinin V. V.** Electromechanical Transducers Based on Ionic Polymer-Polymer Composites 171
Dao Dinh Ha, Stempitsky V. R. Investigation of Hall Sensor Characteristics with Various Geometry of the Active Area 182
Keshavarzdivkolaee K. N., Lukichev V. F., Kalnov V. A., Pevtsov E. F. Comparative Estimation of AlN and PZT Frequency Response Used as a Resonator in the Vibrating Ring Gyroscopes 190

Editorial board:

Abramov I. I. (Belorussia), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Andreev A. (UK), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Baklanov M. R., Dr. Sci. (Chem.), Prof. (China)
Basaev A. S., Cand. Sci. (Phys.-Math.)
Gornev E. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.)
Kuznetsov V. I., Dr. Sci. (Tech.) (Netherlands)
Leonovich G. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Panin G. N., PhD, Prof. (South Korea)
Pozhela K. (Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.)
Ryzhii M. V., (Japan), Dr. Eng., Prof.
Santos E. J. P., PhD, Prof. (Brasil)
Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shashkin V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Singh K., PhD (India)
Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Vikulin V. V., Cand. Chem. Sci., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial staff:

Antonov B. I. (Director Publ.)
Lysenko A. V. (Executive secretary)
Chugunova A. V.
Grigorin-Ryabova E. V.
Fokin V. A., Cand. Sci. (Chem.)
Shchetinkin D. A. (site)

Our:	To subscribe, please contact with: JSC "MK-Periodica": Tel: +7 (495) 672-7012 Fax: +7 (495) 306-3757 E-mail: import@periodicals.ru
Web: www.microsystems.ru/eng : e-mail: nmst@novtex.ru	

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.3.049.77.002

DOI: 10.17587/nmst.20.131-141

В. К. Смолин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: niiis@niiis.nnov.ru,
ФГУП "ФНПЦ НИИ измерительных систем им. Ю. Е. Седакова", г. Нижний Новгород

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ МАСОК ДЛЯ ВЗРЫВНОЙ ЛИТОГРАФИИ

Поступила в редакцию 27.06.2017

Литография является ключевым технологическим процессом в производстве полупроводниковых приборов и микросхем. В статье проанализированы существующие методы формирования топологии пленочных элементов с использованием взрывной литографии и тенденции развития данного направления. При инверсном переносе изображения рисунка резистивной (контактной) маски полностью устраняются трудности, связанные с локальной обработкой активного слоя.

Приведены способы выполнения масок с помощью проекционной литографии и механического переноса изображения. Показаны возможности, ограничения и области применения различных вариантов маскирования.

Ключевые слова: литография, взрывная литография, контактная маска, резистивная маска, наноимпринтинг

Введение

Литография является ключевым технологическим процессом в производстве полупроводниковых приборов и микросхем [1]. По принципу переноса изображения элементов на подложку можно выделить две группы технологических операций: первая реализует прямой перенос рисунка, вторая — инверсный. Наиболее распространены методы первой группы, для которых точность воспроизведения рисунка резистивной маски на активном слое определяется применяемым методом травления.

При инверсном переносе изображения рисунка резистивной (контактной) маски полностью устраняются трудности, связанные с локальной обработкой активного слоя, так как последний осаждается после создания резистивной маски, а удаление ненужных его участков совмещено с операцией снятия резистивной маски. Такая последовательность операций получила название взрывной (Lift-off) литографии. Взрывная литография, несмотря на простоту реализации, обладает рядом недостатков, связанных с ограничениями по температуре подложки при осаждении материала активного слоя и трудностью удаления маски при большой толщине активного слоя.

Однослойные резистивные маски

Материал контактной маски должен удовлетворять в общем случае следующим требованиям [2, 3]:

- не видоизменяться в процессе осаждения пленочных материалов и не образовывать с ними химических соединений;
- обладать малым коэффициентом диффузии;
- легко удаляться с подложки способами, которые не влияют на свойства материала пленочного элемента.

Для эффективного удаления (взрыва) контактной маски необходимо, чтобы толщина контактной маски в 2–3 раза превышала толщину обрабатываемой пленки, а профиль окон маски должен иметь отрицательный наклон.

В качестве основы контактной маски прежде всего используют слои полимерных композиций, самостоятельно образующие рельеф, — фоторезисты. Предпочтение отдается позитивным диазохиноновым (ДХН) фоторезистам, обладающим по сравнению с негативными большей разрешающей способностью и технологичностью. Основными компонентами таких резистов являются светочувствительный продукт (производные О-нафтохинондиазидов) и пленкообразующая составляющая (новолачные или резольные смолы).

Повышение характеристик ДХН резистов для дальнейшего использования в процессах взрывной литографии возможно многообразными способами на различных этапах формирования маски. Основные способы улучшения характеристик масок приведены в таблице.

Повышение термостойкости ДХН резистов достигается также их модификацией, например, путем введения добавок полигидроксилсодержащего соединения (глицерин, полиэтиленгликоль) или нефотоактивного поглощающего вещества на основе жирорастворимых красителей [11, 12].

Применение в качестве пленкообразующей составляющей полииамида позволяет маскам выдерживать температуры нагрева до 350 °C, однако при этом снижается разрешающая способность резиста [13, 14].

Позитивные электронные резисты PMMA, ZEP 520A и AR-P 6200 позволяют формировать отрицательные наклонные стенки, что обусловлено эффектом рассеяния электронов при экспонировании. Также все они обладают стойкостью к повышенной температуре (около 150 °C) [15].

Проблема термостойкости решается в косвенном варианте взрывной литографии при использовании в качестве основы маски неорганических материалов (металлов — алюминия, меди, никеля; диэлектриков — оксида висмута, монооксида германия, оксида европия и др.) [3, 16—18].

В процессах взрывной литографии нанесение активного слоя осуществляется преимущественно методами физического осаждения из газовой фазы (ФОГФ). В [19] предложен способ формирования защитного покрытия из эпоксидной эмали. На керамическую подложку со сформированными резистивными элементами наносят сухой пленочный

фоторезист СПФ-2-40, экспонируют, проявляют и наносят шпателем первый слой эпоксидной эмали. Удаляют механически излишки с поверхности, высушивают при комнатной температуре, наносят второй слой эмали, выдерживают 30 мин при комнатной температуре, в дальнейшем при температуре 100...110 °C (ниже температуры полимеризации фоторезиста) в течение 3...4 ч. Удаляют фоторезистивную маску со следами эмали в органическом растворителе, промывают и подвергают термообработке при температуре 140...160 °C в течение 1...2 ч. Толщина покрытия из эпоксидной эмали составляет 30...40 мкм. Такая плата с набором тонкопленочных резисторов может эксплуатироваться в негерметичных условиях.

В [20] предложен способ, относящийся к нелигографическим микротехнологиям формирования на подложках тонкопленочных рисунков из наносимых на ее поверхность веществ. Способ содержит следующие этапы: формирование масочного островкового слоя, оплавление масочного островкового слоя, напыление слоя второго материала, взрывное удаление масочного островкового слоя, напыление третьего материала и удаление слоя второго материала. Причем материал первого слоя выбирается таким, чтобы не смачивалась поверхность подложки, а оплавление масочного слоя стимулируют либо бомбардировкой медленными ионами, либо обработкой в низкотемпературной плазме, либо облучением потоком электронов.

Способы улучшения характеристик масок из ДХН резистов *Methods for improvement of the mask characteristics from DZQ resists*

№ п/п	Требуемая характеристика <i>The demanded characteristic</i>	Способ реализации <i>Method of realization</i>	Источник <i>Source</i>
1	Термостойкость <i>Thermal stability</i>	Проявление изображения маски в растворе с добавками органического растворителя Обработка сформированной маски в растворе перманганата калия, в формальдегиде, в плазме тлеющего разряда ультрафиолетовым излучением с длиной волны 100...300 нм, ионной или электронной бомбардировкой <i>Development of the mask image in a solution with additives of an organic solvent.</i> <i>Processing of the formed mask in a permanganate solution of potassium, in formaldehyde, in plasma of a glow discharge, by an ultra-violet radiation with the wavelength of 100...300 nm, by an ion or electron bombardment</i>	[2, 4]
2	Отрицательный угол наклона <i>Negative inclination angle</i>	Обработка материала маски до проявления в растворе неионогенного ПАВ Введение в проявитель 1—5 %-го растворителя пленкообразующей основы Обработка перед задубливанием в плазме ВЧ разряда в среде аргона или азота Обработка сформированного рельефа маски в парах органического растворителя <i>Processing of the mask material up to appearance of a nonionic surfactant in the solution. Introduction in the developer of 1—5 % solvent of a film-forming basis.</i> <i>Processing before baking in a high frequency discharge plasma in the environment of argon or nitrogen.</i> <i>Processing of the formed relief of a mask in the vapors of an organic solvent</i>	[2, 5, 8]
3	Другие параметры (адгезия, газовыделение при нагреве в вакууме и др.) <i>Other parameters (adhesion, gas evolution during heating in vacuum, etc.)</i>	Проявление изображения маски в растворе с добавками перманганата калия Обработка перед задубливанием ультрафиолетовым излучением Задубливание с промежуточной обработкой в жидким азотом Полимеризация с использованием сильных электрических полей <i>Development of a mask image in a solution with the additives of potassium permanganate.</i> <i>Processing before baking by an ultra-violet radiation.</i> <i>Baking with the use of an intermediate processing in a liquid nitrogen.</i> <i>Polymerization with the use of strong electric fields</i>	[2, 5, 9, 10]

Двухслойные резистивные маски

Для резистивных масок требования по одновременному обеспечению надежного контроля размеров окон, высокому разрешению и хорошему покрытию ступеньки рельефа подложки являются взаимоисключающими. При использовании толстых резистов ухудшается разрешение; высокие его значения для тонких резистов ограничиваются образованием стоячих волн в фоторезисте или обратным рассеиванием электронов в электронорезисте.

Компромиссный вариант реализуется для многослойных систем резистов, в которых нижний слой, обычно полимер, достаточно толстый по сравнению со ступенькой, планаризирует рельеф подложки, а в нанесенном сверху тонком слое резиста создается соответствующий микрорисунок, который переносят на нижний резистивный слой. Полученная в результате многослойная (минимум — двухслойная) резистивная маска является идеальной для процесса взрывной литографии, поскольку нижний слой большой толщины имеет профиль с вертикальными или отрицательно наклоненными боковыми стенками.

В [21] приведен способ формирования функциональных элементов на подложках устройств трехмерных микромеханических систем с использованием взрывной литографии. На подложку, имеющую вытравленные углубления, наносят слой негативного фоторезиста, из которого формируют защитные участки над вытравленными элементами. Маску для взрывной литографии формируют из позитивного фоторезиста, которую после осаждения активного слоя удаляют в растворителе, а затем снимают негативный резист плазменным травлением, открывая вытравленные углубления. В данном случае композиционное покрытие из двух резистов нельзя классифицировать как многослойную резистивную маску.

Двухслойная резистивная маска может, в зависимости от поставленных задач, выполняться в различных комбинациях материалов слоев и условиях формирования.

Создание ступенчатого профиля стенки (интегральный отрицательный наклон) двухслойных резистивных масок на основе позитивных фоторезистов обеспечивается за счет разной скорости растворения материалов при проявлении. В способе, предложенном в [22], нижний слой фоторезиста экспонируется без шаблона по всей поверхности подложки, затем наносят второй слой фоторезиста и формируют скрытое изображение экспонированием через шаблон, при этом экспозицию первого слоя выбирают равной $(0,5...0,6)t_{92}$, где t_{92} — значение экспозиции второго слоя в диапазоне фотографической широты применяемого фоторезиста. Для обеспечения возможности использования тол-

стых слоев ДХН фоторезистов формирование второго слоя осуществляют в два цикла с промежуточной сушкой наносимых слоев, что позволяет пузырькам молекулярного азота диффундировать к внешней границе маски, обеспечивая качественное проведение обратной фотолитографии и увеличение процента выхода годных структур после фотолитографии [23].

Хорошее покрытие ступеньки рельефа подложки достигается при использовании толстых резистов, что влечет ухудшение разрешения. Вместе с тем, высокие его значения легче получить для тонких резистов, однако при этом оно ограничивается образованием стоячих волн в фоторезисте. В качестве планаризирующего слоя используют, как правило, электронорезист на основе полиметилметакрилата (PMMA) и его сополимеров или непроточувствительный резист LOR (Lift-Off Resist) на основе полиметилглутаримида. Данный метод позволяет получить отношение высоты маски к ширине окна 4:1 для элементов размером от 0,5 до 5 мкм, однако повышенная трудоемкость, связанная с необходимостью двойного экспонирования, ограничивает применение этого способа [15, 24]. Двухслойные маски с "рисующим" слоем на основе позитивного фото- или электронорезиста применяются для создания межэлементной металлизации монолитных интегральных схем и Т-образных затворов СВЧ транзисторов [25—28].

Двухслойная маска, состоящая из пленки металла (толщина 0,1 мкм) и позитивного фоторезиста (0,6 мкм), используется для получения рисунка на пленке алюминия. После проявления фоторезиста осуществляют травление металла за время, превышающее время его удаления с открытых участков, обеспечивая подтрав элементов металла примерно на 0,3 мкм. В сечении структура элемента контактной маски получается грибообразной, т.е. с нависающим по краям элемента фоторезистом [29]. Прием самосовмещения, основанный на формировании хорошо контролируемого подтрава тонкой металлической пленки заданной толщины под резист, резкость края которого обеспечивается специальной плазменной обработкой, используется для получения затворов нанотранзисторов длиной 35...40 нм [30]. Это позволяет создать оригинальный технологический маршрут для производства нанотранзисторов и интегральных схем на их основе с применением только оптической литографии [31].

При использовании вместо металла металлоорганических соединений, наносимых из раствора методом центрифугирования, процесс формирования слоев маски можно унифицировать. В работе [29] показано, что пленки карбосилата олова, нанесенные на подложку и обработанные при температурах ниже температуры полного разложения

соединения, обладают способностью травиться в водощелочном проявителе ДХН резиста, т.е. процесс образования рельефа осуществляется в момент проявления резиста. Температуры, используемые для частичного разложения металлоорганических соединений, составляют, например, для гексаната олова 110...130 °С и ~240...245 °С — для неодеканата олова [32]. Нами в качестве материала нижнего слоя применялись пленки алкооксида олова, которые наносились из истинного раствора концентрацией 0,5 моль · г⁻¹ методом центрифугирования, а затем высушивались на воздухе в течение 20...30 мин при температуре 120...130 °С. Проявление фоторезистивной маски и удаление промежуточного соединения олова проводили в 0,6 %-м растворе KOH при времени обработки 70...75 с.

Общим недостатком двухслойных резистивных масок является плохая совместимость верхнего и нижнего слоев по режимам термообработки, вызывающая деградацию их первоначальных свойств. Ввиду плохой совместимости верхнего и нижнего слоев по режимам термообработки верхний слой заменяют неорганическим резистом Ge—Se толщиной 0,2 мкм, легированным серебром, на котором экспонированием УФ излучением создают микрорисунок; с помощью реактивного ионного травления в плазме кислорода последний переносят на нижний полимерный слой PMMA толщиной 2,5 мкм [24].

Среди других комбинаций материалов слоев маски следует отметить сочетание слоев двуокиси кремния (толщиной 0,25 мкм) и нитрида кремния (толщиной 0,13 мкм), применявшиеся для формирования рисунка элементов на основе пленок платины толщиной 50 нм. Проблема адгезии пленки чистой платины была решена при использовании магнетронного напыления платины при температуре подложки 350 °С [33].

Трехслойные резистивные маски

Для решения проблемы совместимости первого и второго слоев наиболее эффективен переход на трехслойные резистивные системы.

T-образные затворы на основе Ti/Mo/Cu и Ti/Al с длинами оснований 150 нм для GaAs СВЧ транзисторов были сформированы с помощью электронно-лучевой литографии. Для этого использовались трехслойные резистивные маски на основе 950 PMMA/LOR 5B/495 PMMA. Каждый слой резиста наносился на подложку методом центрифугирования с последующей сушкой при температуре 180 °С в течение 5 мин. Экспонирование проводилось с помощью системы электронно-лучевой нанолитографии Raith-150TWO с энергией 30 кэВ и диаметром электронного луча 2 нм. Осаждение затворных металлизаций на основе Ti/Mo/Cu (25/25/400 нм) и Ti/Al (50/370 нм) осу-

ществлялось методом электронно-лучевого испарения в вакууме [34].

Достижения в разработке новых полимеров и в электронной оптике позволили с помощью взрывной литографии изготавливать топологические элементы с размерами менее 0,1 мкм [36]. Однако, по мнению специалистов, оптическая литография столкнется с техническими ограничениями, когда топологическая норма станет меньше 45 нм. Наноимпринт-литография (NIL, Nanoimprint Lithography) с существенно меньшими материальными затратами перекрывает несколько топологических норм и работает вплоть до 16 нм [37].

Вопросы практической интеграции NIL в изготовление СБИС имеют многообразные решения. Обращенная S-FIL/R-литография по сравнению с прямой S-FIL- (Step and Flash Imprint Lithography) литографией позволяет получать более качественный топологический рисунок на непланарных поверхностях пластин в более толстых передаточных слоях, поэтому является лучшим вариантом для создания нанотопологий в функциональных слоях интегральных схем. S-FIL/R-литография может быть совмещена со стандартной оптической проекционной литографией.

В процессе S-FIL/R, разработанном специалистами фирм Molecular Imprints и Motorola [38], для выполнения литографии на пластинах, имеющих рельеф предыдущих топологических слоев, используется трехслойный резист. В работе [39] приведена последовательность формирования трехслойной маски PMMA/Si₃N₄/LOR (100/50/350 нм) с использованием NIL. Для формирования такой системы на первом этапе на подложку наносится слой LOR. Его сушка должна осуществляться при температуре, превышающей температуру осаждения Si₃N₄ как минимум на 30 °С. Это обеспечивает стабильное формирование слоя диэлектрика. На втором этапе поверх LOR методом плазмостимулированного осаждения из газовой фазы осаждается тонкий слой нитрида кремния. Температура реактора при этом не должна превышать 200 °С, так как при более высоких температурах происходит удаление слоя LOR. На последнем этапе поверх Si₃N₄ наносится слой PMMA толщиной 100 нм. После наноимпринт-литографии осуществляется плазмохимическое травление промежуточного слоя Si₃N₄ в атмосфере CHF₃/Ar по маске PMMA. Высокая селективность травления позволяет перенести даже рельеф с малой глубиной структурирования; получен стабильный перенос изображения с глубиной структур 20 нм из PMMA в Si₃N₄. На втором этапе с помощью плазмохимического травления в атмосфере O₂ проводится травление подслоя LOR по маске Si₃N₄. Схематическое изображение процесса формирования элементов с использованием трехслойной системы резистов показано

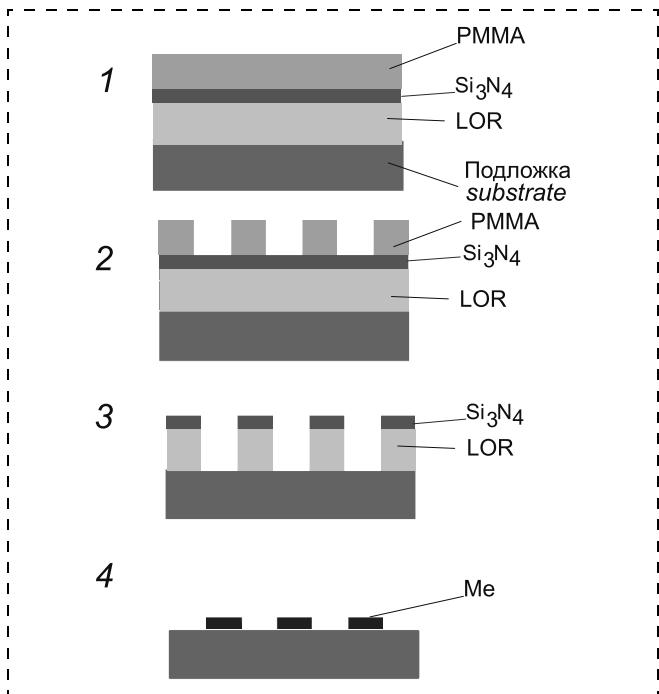


Схема формирования структур с использованием трехслойной системы PMMA/Si₃N₄/LOR: 1 — нанесение на подложку слоев маски; 2 — NIL; 3 — последовательное травление Si₃N₄ и PMMA; 4 — осаждение металла и lift-off

The scheme of formation of structures with the use of PMMA/Si₃N₄/LOR three-layer system: 1 — deposition of the mask layers on a substrate; 2 — NIL; 3 — consecutive etching of Si₃N₄ and PMMA; 4 — deposition of metal and lift-off

на рисунке. Использование плазмохимического травления на всех этапах процесса обеспечивает высокое аспектное соотношение формируемых структур.

Приведенный процесс S-FIL/R-литографии обеспечивает создание на подложке из ниобата лития встречечно-штыревых структур с шагом 200 нм и толщиной металлизации около 100 нм.

Заключение

В настоящее время стратегическим путем развития технологии микро- и наноэлектроники являются литографические методы создания топологии структур. Для формирования микро- иnanoструктур используется подход "сверху вниз" (top-down), т.е. осуществляется локальное удаление ненужных областей функциональных слоев заготовки путем их травления. При этом точность воспроизведения размеров элементов структур (разрешение, локальность травления) в горизонтальной плоскости обеспечивается с помощью резистивных масок, сформированных в процессах литографии. Альтернативой прямой литографии является инверсная (взрывная) литография.

В связи с замедлением темпа развития и быстрым удорожанием систем фотолитографии и комплектов фотошаблонов для уровней технологии

менее 50 нм в условиях мини-фабрик экономически эффективными становятся системы многолучевой безмасочной электронно-лучевой литографии и наноимпринт-литографии. Все преимущества наноимпринт-литографии проявляются при изготовлении приборов на базе регулярных структур (устройств памяти, изделий микросистемной техники), в которых основные характеристики повышаются с уменьшением размеров.

Список литературы

- Бобков С. Г., Киреев В. Ю. Проблемы перехода микроэлектроники в субстананометровую область размеров. Ч. 1. Общие положения и возможности литографических и нелитографических методов формирования топологий // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 5. С. 11—21.
- Моро У. Микролитография. Принципы, методы, материалы. Пер. с англ. В двух частях. М.: Мир, 1990. Ч. 1 — 606 с., Ч. 2 — 632 с.
- Введение в фотолитографию / Под ред. В. П. Лаврищева. М.: Энергия, 1977. 400 с.
- Зыкова О. В., Фролов В. М., Беляева Т. В. Способ упрочнения фоторезистивной маски. Патент РФ № 1804223, опубл. 27.03.1996.
- Ткаченко А. С., Бугай П. С., Ярандин В. А. Способ формирования фоторезистивной маски для плазменного травления. А. с. СССР № 1099779, опубл. 23.10.1990.
- Ионов Б. В., Новожилова Г. И., Еремина Е. И. и др. Способ формирования защитной маски. А. с. СССР № 1290907, опубл. бюл. № 6, 1987.
- Белых Ю. Г., Тимашев В. В., Федорец В. Н. Способ фотолитографии. Патент РФ № 1450671, опубл. 15.03.1994.
- Григорьев В. Е., Карпова С. А., Соколов С. Е. Способ получения рисунка. А. с. СССР № 1027793, опубл. бюл. № 25, 1983.
- Латышева Н. Д., Скупов В. Д., Смолин В. К. Способ формирования фоторезистивной маски. Патент РФ № 2195047, опубл. 20.12.2000.
- Смолин В. К., Голубева Л. Н. Способ изготовления гибкого печатного кабеля. Патент РФ № 2032288, опубл. бюл. № 9, 1995.
- Ламбакшев А. Ф., Котомина В. Е., Зеленцов С. В., Антонов И. Н., Горшков О. Н. Способ взрывной фотолитографии. Патент РФ № 2610843, опубл. 16.02.2017.
- Жулай А. П., Калоева Т. В., Дулимов В. М. и др. Способ изготовления фотошаблонов. А. с. СССР № 1600528, опубл. бюл. № 38, 1988.
- Лаймен Дж. Использование полимида для "взрывной" фотолитографии // Электроника. 1979. Т. 52, № 25 (577). 9 с.
- Гончарова Т. С. Полимиидные пленки в качестве межслойных изолирующих и пассивирующих слоев ИС // Зарубежная электронная техника. 1989. № 8 (339). С. 53—82.
- Скупов А. Основные свойства и характеристики современных резистов для электронной литографии // Вектор высоких технологий. 2016. № 8 (29). С. 26—31.
- Смолин В. К., Фомин В. И., Уткин В. П., Маленская В. П. Способ изготовления контактных окон в гибридных схемах с многослойной металлизацией. А. с. СССР 554753, зарегистрир. 21.12.1976.
- Смолин В. К. Контактная маска. А. с. СССР 1082245, зарегистрир. 22.11.1983.
- Минеева М. А., Муракаева Г. А. Способ изготовления омических контактов к планарной стороне структуры с локальными областями низколегированных полупроводников группы A₃B₅. Патент РФ № 2084988, опубл. 20.07.1997

19. Симакова А. Н., Смолин В. К. Способ изготовления резистивной тонкопленочной схемы. А. с. СССР № 1279423, зарегистрир. 22.08.1986.
20. Чесноков В. Д. Способ взрывной литографии пленочных островковых структур. Патент РФ № 2400790, опубл. 27.09.2010.
21. Конта Р., Дизеня И. Способ выборочного покрытия микрообработанной поверхности. Патент РФ № 2334304, опубл. 20.09.2008.
22. Смолин В. К., Донина М. М. Способ фотолитографии. Патент РФ № 2096935, опубл. 20.11.1997.
23. Ильин Е. Ю., Жуков А. А., Попова Е. В., Павлов А. А. Способ фотолитографии. Патент РФ № 2586400, опубл. 10.06.2016.
24. Беднарж Б., Ельцов А. В., Заховал Я., Краличек Я., Юрре Т. А. Светочувствительные полимерные материалы / Под ред. А. В. Ельцова. Л.: Химия, 1985. 296 с.
25. Великовский И. Э., Дюжиков В. И. Получение субмикронных затворов СВЧ-транзисторов методом ультрафиолетовой фотолитографии // Приборы. 2009. № 5. С. 58–62.
26. Федотова Ю. Ю., Анищенко Е. В., Ишуткин С. В., Кагадей В. А. Разработка двухслойной маски с использованием метода термического оплавления для изготовления макета Т-образного затвора длиной 70 нм // Мокеровские чтения. 6-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологииnanoструктур СВЧ электроники, 20–21 мая 2015 г. Сб. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. С. 48.
27. Ишуткин С. В., Кагадей В. А., Ерофеев Е. В., Анищенко Е. В. Формирование межэлементной металлизации GaAs монолитных интегральных схем на основе меди // Микроэлектроника. 2015. Т. 44, № 4. С. 282–289.
28. Андреев В. М., Калюжный Н. А., Лантратов В. М., Солдатенков Ф. Ю., Усикова А. А. Способ формирования контакта для наногетероструктуры фотоэлектрического преобразователя на основе арсенида галлия. Патент РФ № 2 428 766, опубл. 10.09.2011.
29. Илькаев Д. Р., Кривоспицкий А. Д., Окишин А. А., Орликовский А. А., Семин Ю. Ф. Нестандартные методы формирования субмикронных структур в микроэлектронике // Микроэлектроника. 1996. Т. 25, № 5. С. 339–349.
30. Валиев К. А., Горбацевич А. А., Кривоспицкий А. Д. и др. Способ изготовления полупроводникового прибора с Т-образным управляющим электродом субмикронной толщины. Патент РФ № 2192069, опубл. 10.07.2000.
31. Krivospitsky A. D., Okshin A. A., Orlikovsky A. A., Semin Yu. F. Submicron structures formation with the help of usual photolithography and self-formation method // Proc. of IPT RAS. Ed. By A. A. Orlikovsky. 2000. Vol. 16. P. 71–83.
32. Adams A., Capio C. Edge Profiles in the Plasma Etching of Polycrystalline Silicon // J Electrochem. Soc. 1981. Vol. 128, N. 2. P. 366–370.
33. Балан Н. Н., Васин В. А., Ивашов Е. Н., Львов Б. Г., Невский А. Б., Степанчиков С. В. Микро- и наноинженерия в электронном машиностроении: серия из 7 монографий. Наноинженерия туннельных преобразователей. Ивантеевка: Издательство НИИ предельных технологий, 2012. 200 с.
34. Ерофеев Е. В., Казимиров А. И. Разработка GaAs СВЧ-транзисторов с металлизацией на основе Al и Cu // Доклады ТУСУРа, № 2 (26), часть 1, декабрь 2012. С. 47–52.
35. Александров С., Алексеев А. Субмикронная контактная металлизация. Выбор технологии // Наноиндустрия. 2009. № 6. С. 4–7.
36. Бобков С. Г., Киреев В. Ю. Проблемы перехода микроЭлектроники в субстананометровую область размеров. Ч. 2. Возможности наноимпринт литографии и проекционной оптической литографии // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 6. С. 8–18.
37. Бобков С., Врублевский Э., Киреев В., Недзвецкий В., Трапалин А., Томпсон И., Дойл Г., Хуснатдинов Н., Лабрейк Д. Возможности и особенности наноимпринтлитографии для производства интегральных микросхем // Наноиндустрия. 2007. № 3. С. 26–32.
38. Sreenivasan V., McMackin J., Xu F., Wang D., Stecey N., Resnick D. Using reverse-tone bilayer etch in ultraviolet nanoimprint lithography // MICRO. 2005. Vol. 23, N. 1. P. 37–45.
39. Зайцев А. А. Исследование и разработка методов формирования устройств наноэлектроники с применением технологии наноимпринт-литографии. Диссертация ... кандидата технических наук. Москва, МИЭТ, 2014. 125 с.

V. K. Smolin, Ph. D., Senior Researcher,
FRPC Research Institute of Measuring Systems named after Yu. Ye. Sedakov, Nizhniy-Novgorod,
603950, Russian Federation, niiis@niiis.nnov.ru

Corresponding author:

Smolin Valentin K., Ph. D., Senior Scientist, FRPC Research Institute of Measuring Systems named after Yu. Ye. Sedakov, Nizhniy-Novgorod, 603950, Russian Federation niiis@niiis.nnov.ru

Methods to Create Masks for Explosive Lithography

Received on June 27, 2017
Accepted on July 20, 2017

Lithography is a fundamental process in the semiconductor and microcircuit productions. The author analyzes the existing methods for formation of the topology for the film elements employing the lift-off lithography, and the corresponding development trends. An inverse pattern image transfer of the resistive (contact) mask eliminates completely the problems connected with the local processing of the active layer.

The author presents methods for production of the masks with the use of the design lithography and mechanical image transfer, and also the opportunities, restrictions and spheres of application of various versions of masking.

Keywords: lithography, lift-off lithography, contact mask, resistive mask, nanoimprinting

For citation:

Smolin V. K. Methods to Create Masks for Explosive Lithography, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 131–141.

DOI: 10.17587/nmst.20.131-141

Introduction

Lithography is a key technological process for manufacture of the semi-conductor devices and microcircuits [1]. By the principle of transfer of the elements' images on a substrate it is possible to single out two groups of the technological operations — the first one realizes a direct transfer, the second one — an inverse transfer. The methods of the first group, in which the accuracy of reproduction of a figure of a resistive mask on the active layer is determined by the applied etching, are more wide-spread.

The inverse transfer of the image of a figure of a resistive (contact) mask eliminates completely the problems connected with the local processing of the active layer, because the latter is deposited after creation of a resistive mask, while removal of the unnecessary sites is combined with the operation of removal of the resistive mask. Such a sequence of operations got the name of the lift-off lithography. Notwithstanding the simplicity of its realization, the lift-off lithography has a number of drawbacks connected with the temperature restrictions of the substrate during deposition of the material of the active layer and difficulty with removal of a mask in case of a big thickness of the active layer.

Single-layer resistive masks

In general, the material for a contact mask should meet the following requirements [2, 3]:

- it must not change in the course of the deposition of the film materials and must not form chemical compounds with them;
- it must have a small diffusion coefficient;
- it should be easy to remove from a substrate by the methods, which do not influence the properties of the material of a film element.

For an effective lift-off (explosion) of a contact mask the thickness of a contact mask should 2 or 3 times exceed the thickness of the processed film, while the profile of the windows of a mask should have a negative inclination.

As the basis for the contact mask the layers of the polymeric compositions independently forming a relief — the photoresists are used. The preference is given to the positive diazoquinone (DZQ) photoresists, possessing a higher resolution and better adaptability to manufacture in comparison with the negative ones. The basic components of such resists are a photosensitive product (derivative of O-naphthoquinonediazids) and a film-forming component (novolak or resol resins). Improvement of characteristics of DZQ resists for the use in the lift-off lithography is possible at various stages of a mask formation. The basic methods for improve-

ment of the mask characteristics are presented in the table below.

Improvement of the thermal stability of DZQ resists is also reached, for example, by their modification, introduction of the additives of the polihydroxyl-containing compounds (glycerine, polyethylene glycol) or a non-photoactive absorbing substance on the basis of the fat-soluble dyes [11, 12].

Application of polyimide as a film-forming component allows the masks to withstand temperatures of heating up to 350 °C, however, the resolution of the resist decreases [13, 14].

PMMA, ZEP 520A and AR-P 6200 positive electron resists make it possible to form negative inclined walls, which is due to the effect of scattering of the electrons during an exposure. Besides, all of them are resistant to high temperatures (about 150 °C) [15].

In the lift-off lithography the problem of the thermal stability is solved due to the use of inorganic materials (metals — aluminum, copper, nickel; dielectrics — bismuth oxide, germanium monoxide, europium oxide, etc.) as the mask basis [3, 16—18].

In the lift-off lithography deposition of the active layer is carried out by the methods of physical deposition from the gas phase (PDGP). In [19] a method is proposed for formation of a protective coating from the epoxy enamel. SPF-2-40, dry film photoresist, is deposited on a ceramic substrate with the formed resistive elements, exposed, developed, and then the first layer of the epoxy enamel is deposited. The surpluses are removed mechanically from the surface, then we dry it up at a room temperature, put the second layer of the enamel, keep it for 30 min. at a room temperature, and then at 100...110 °C (below polymerization temperature of the photoresist) during 3...4 h. The photoresist mask and the traces of the enamel are removed in an organic solvent, washed and subjected to heat treatment at 140...160 °C during 1...2 h. The thickness of the coating from the epoxy enamel is 30...40 μm. Such a board with a set of thin-film resistors can be operated in untight conditions.

In [20] a method is proposed belonging to non-lithographic microtechnologies for formation of thin-film figures on substrates from the substances deposited on its surface. The method has the following stages: formation of a mask island layer, melting of the mask island layer, deposition of a layer of the second material, a lift-off removal of the mask island layer, deposition of the third material and removal of the layer of the second material. At that, the material for the first layer is selected so that the substrate surface would not be moistened, and melting of the mask layer would be stimulated by a bombardment of the slow ions, or by processing in a low-temperature plasma, or by irradiation with a flow of electrons.

Two-layer resistive masks

For the resistive masks the requirements for a simultaneous reliable control of the sizes of the windows, a high resolution and a good coating of the step of the relief of a substrate are mutually exclusive. The use of the thick resists worsens the resolution; its high values for thin resists are limited by the formation of the standing waves in a photoresist or backscattering of the electrons in an electron-beam resist.

A compromise version is realized for the multilayer systems resists, in which the bottom layer, usually a polymer, thick enough in comparison with a step, planarizes the substrate relief, while in the thin layer of the resist deposited over it, a corresponding micro-figure is created, which is transferred to the bottom resistive layer. The received multilayer (minimum, two-layer) resistive mask is ideal for the lift-off lithography, because the bottom layer of a big thickness has a profile with the vertical or negatively inclined lateral walls.

In [21] a method is presented for formation of the functional elements on the substrates of the devices of 3D micromechanical systems with the use of the lift-off lithography. On a substrate with etched deepenings, a layer of a negative photoresist is deposited, from which the protective sites are formed over the etched elements. A mask for the lift-off lithography is formed from a positive photoresist, which after the deposition of the active layer is removed in a solvent, and then the negative resist is removed by plasma etching, opening the etched deepenings. In this case the composite coating from two resists cannot be classified as a multilayer resistive mask. Depending on the set tasks, the resistive mask can be implemented in various combinations of the materials of layers and formation conditions.

Creation of a step profile of a wall (integral negative inclination) of the two-layer resistive masks on the basis of the positive photoresists is ensured due to different speeds of dissolution of the materials during development. In the method proposed in [22] the bottom layer of the photoresist is exposed without a template on all the surface of a substrate, then the second layer of the photoresist is deposited and a latent image is formed by exposure through a template, at that, the exposure of the first layer is selected as equal to $(0.5...0.6)t_{\phi 2}$, where $t_{\phi 2}$ — value of the exposure of the second layer within the range of the photographic width of the applied photoresist. In order to ensure the use of the thick layers of DZQ photoresists, the formation of the second layer is carried out in two cycles with an intermediate drying of the deposited layers, which allows the bubbles of the molecular nitrogen to diffuse to the external border of the mask, ensuring a reverse photolithography and increase of the percent of the output of suitable structures after the photolithography [23].

A good coating of the relief step of a substrate is achieved due to the use of a thick resist, which involves deterioration of the resolution. At the same time, high values are easier to achieve for the thin resists, however, they are limited by formation of the standing waves in a photoresist. As a rule, the role of the planarizing layer is played by an electron-beam resist on the basis of polymethylmethacrylate (PMMA) and its copolymers or non-photosensitive resist, LOR (Lift-Off Resist) on the basis of polymethyl glutarimide. The given method allows us to receive the correlation of the height of a mask to the window width of 4:1 for the elements with the sizes from 0.5 up to 5 μm , however, a higher labor input, connected with the necessity of a double exposure, limits application of this method [15, 24]. The two-layer masks with a "drawing" layer on the basis of a positive photo — or electron-beam resist are applied for creation of an interelement metallization of the monolithic integrated circuits and T-shaped gates of the microwave frequency transistors [25–28].

A two-layer mask from a metal film ($0.1 \mu\text{m}$) and positive photoresist ($0.6 \mu\text{m}$) is used for obtaining of a figure on an aluminum film. After development of the photoresist a metal etching is carried out during the period exceeding the time of its removal from the open sites, ensuring underetching of the metal elements approximately by $0.3 \mu\text{m}$. In section the structure of the element of a contact mask has a mushroom-like form, i.e. with the photoresist hanging over along the edges of the element [29]. The self-alignment method based on formation of a well-controlled "underetching" of a thin metal film of a set thickness for a resist, the sharpness of the edge of which is ensured by a special plasma processing, is used for obtaining of the gates of the nanotransistors with the lengths of $35...40 \text{ nm}$ [30]. This allows us to create an original technological route for manufacture of nanotransistors and integrated circuits on their basis with application of only optical lithography [31].

In case, when instead of a metal the metalloorganic compounds are used deposited from a solution by the centrifugation method, the process of formation of the mask layers can be unified. In [29] it is demonstrated, that the films of tin carboxilate, deposited on a substrate and processed at the temperature below that of a complete decomposition of a compound, possess an ability to be etched in the water-alkaline developer of DZQ resist, i.e. the process of formation of a relief is carried out at the moment of development of the resist. The temperatures used for a partial decomposition of the organometallic compounds, for the tin hexanate, for example, are $110...130^\circ\text{C}$ and $\sim 240...245^\circ\text{C}$ — for the tin neodecanoate [32]. As the material for the bottom layer we applied tin alkoxide films, which were deposited from a true solution with concentration of $0.5 \text{ mol} \cdot \text{g}^{-1}$ by the centrifugation method and then were dried up in the air during $20...30 \text{ min}$ at $120...130^\circ\text{C}$. The devel-

opment of the photoresist mask and removal of the intermediate compound of tin were done in 0.6 % solution of KOH at the time of processing of 70...75 s.

A common drawback of the two-layer resistive masks is a poor compatibility of the top and bottom layers by the heat treatment modes, causing a degradation of their initial properties. Because of a poor compatibility of the top and bottom layers by the heat treatment modes the top layer is replaced with Ge—Se inorganic resist with thickness of 0.2 μm , alloyed with silver, on which by means of UV radiation exposure a microfigure is created; by means of jet ion etching in oxygen plasma the latter is transferred to the bottom polymeric PMMA layer with thickness of 2.5 μm [24].

Among other combinations of materials for the mask layers it is necessary to mention a combination of the layers of the silicon dioxide (0.25 μm) and silicon nitride (0.13 μm), applied for formation of a figure of elements on the basis of platinum films with thickness of 50 nm. The problem of adhesion of a film of pure platinum was solved due to the use of the magnetron platinum deposition at the substrate temperature of 350 °C [33].

Three-layer resistive masks

For solving of the problem of compatibility of the first and second layers, a transition to the three-layer resistive systems is most effective.

T-shaped gates on the basis of Ti/Mo/Cu and Ti/Al with the lengths of their bases of 150 nm for GaAs microwave frequency transistors were formed with the use of the electron beam lithography. Three-layer resistive masks on the basis of 950 PMMA/LOR 5B/495 PMMA were used for this purpose. Each layer of the resist was deposited on a substrate by the centrifugation method with the subsequent drying at 180 °C within 5 min. Exposure was done by means of Raith-150TWO electron beam nanolithography system with energy of 30 keV and diameter of the electronic beam of 2 nm. The deposition of the gate metallizations on the basis of Ti/Mo/Cu (25/25/400 nm) and Ti/Al (50/370 nm) was carried out by the method of the electron beam evaporation in vacuum [34].

Achievements in development of new polymers and in electronic optics allowed us to make the topological elements with the sizes less than 0.1 μm by means of the lift-off lithography [36]. However, according to experts, the optical lithography will face technical restrictions when the topological standard becomes less than 45 nm. Nanoimprint Lithography (NIL) with essentially smaller material inputs embraces several topological standards and works up to 16 nm [37].

The questions of practical integration of NIL in manufacturing of GSI have diverse solutions. The reverse S-FIL/R lithography in comparison with the direct Step and Flash Imprint Lithography (S-FIL) al-

lows us to receive better topological figure on the non-planar surfaces of the plates in thicker transfer layers, therefore, it is the best way for creation of the nanotopologies in the functional layers of the integrated circuits. S-FIL/R lithography can be combined with the standard optical projective lithography.

In the course of S-FIL/R, developed by experts [38] for the lithography on the plates with the relief of the previous topological layers, a three-layer resist is used. In [39] the sequence of formation of PMMA/Si₃N₄/LOR (100/50/350 nm) three-layer mask with the use of NIL is presented. At the first stage of the system formation a layer of LOR is deposited on a substrate. Its drying should be carried out at the temperature exceeding, at least, by 30 °C that of the deposition of Si₃N₄. This ensures a stable formation of a dielectric layer. At the second stage a thin layer of a silicon nitride is deposited over LOR by the method of plasma stimulation from the gas phase. The reactor temperature should not exceed 200 °C, because at higher temperatures the layer of LOR is destroyed. At the last stage the PMMA layer with thickness of 100 nm is deposited over Si₃N₄. The nanoimprint lithography is followed by a plasma-chemical etching of the intermediate layer of Si₃N₄ in the atmosphere of CHF₃/Ar by PMMA mask. High selectivity of the etching allows us to transfer a relief with even a small depth of the structurization; a stable transfer of an image with the depth of the structures of 20 nm from PMMA into Si₃N₄ was obtained. At the second stage by means of the plasma-chemical etchings in the atmosphere of O₂ the etching of the intermediate layer of LOR is done by Si₃N₄ mask. A schematic image of the process of formation of the elements with the use of the three-layer system of resists is shown in the figure. Use of the plasma-chemical etching at all the stages of the process ensures a high aspect correlation of the formed structures.

The presented process of S-FIL/R lithography ensures creation on a substrate from lithium niobate of the interdigital structures with a step of 200 nm and thickness of metallization of about 100 nm.

Conclusion

The lithographic methods for creation of the topology of structures are the strategic direction in the development of the technology of the micro- and nano-electronics. For formation of the micro- and nano-structures the top-down approach is used, i.e. local removal of the redundant areas of the functional layers of a work piece by their etching. At that, the accuracy of reproduction of the sizes of the elements of the structures (resolution, locality of etching) in a horizontal plane is ensured by means of the resistive masks formed in the processes of lithography. An alternative to the direct lithography is the inverse (lift-off) lithography.

In connection with a slowdown of the rate of development and growing costs of the photolithography systems and sets of the photo masks for the technological levels less than 50 nm, in the conditions of minifactories the systems of the multibeam no-mask electron-beam lithography and nanoimprint lithography become economically effective. All the advantages of the nanoimprint lithography are visible in manufacturing of the devices on the basis of the regular structures (memory devices, products of microsystem technologies), in which the basic characteristics are improved with a reduction of the dimensions.

References

1. **Bobkov S. G., Kireev V. Yu.** Problemy perehoda mikro`elektroniki v substananometrovuyu oblast' razmerov. Ch. 1. Schbschie polozheniya i vozmozhnosti litograficheskikh i nelitograficheskikh metodov formirovaniya topologij, *Nano- i mikrosistemnaya tehnika*, 2007, no. 5, pp. 11—21 (in Russian).
2. **Moro U.** *Mikrolitografiya. Principy, metody, materialy*. Per. s angl. V dvuh chastyah., Moscow, Mir, 1990. Ch. 1 — 606 p., Ch. 2 — 632 p.
3. **Vvedenie v fotolitografiyu.** Pod red. V. P. Lavrischeva. Moscow, 'Energiya, 1977. 400 p. (in Russian).
4. **Zykova O. V., Frolov V. M., Belyaeva T. V.** *Sposob uprrochneniya fotorezistivnoj maski*. Patent RF № 1804223, opubl. 27.03.1996 (in Russian).
5. **Tkachenko A. S., Bugaj P. S., Yarandin V. A.** *Sposob formirovaniya fotorezistivnoj maski dlya plazmennogo travleniya*. A. s. SSSR № 1099779, opubl. 23.10.1990 (in Russian).
6. **Ionov B. V., Novozhilova G. I., Eremina E. I.** i dr. *Sposob formirovaniya zaschitnoj maski*. A. S. SSSR № 1290907, opubl. byul. № 6, 1987 (in Russian).
7. **Belyh Yu. G., Timashev V. V., Fedorec V. N.** *Sposob fotolitografi*. Patent RF № 1450671, opubl. 15.03.1994 (in Russian).
8. **Grigor'ev V. E., Karpova S. A., Sokolov S. E.** *Sposob polucheniya risunka*. A. s. SSSR № 1027793, opubl. byul. № 25, 1983 (in Russian).
9. **Latysheva N. D., Skupov V. D., Smolin V. K.** *Sposob formirovaniya fotorezistivnoj maski*. Patent RF № 2195047, opubl. 20.12.2000 (in Russian).
10. **Smolin V. K., Golubeva L. N.** *Sposob izgotovleniya gibkogo pechatnogo kabelya*. Patent RF № 2032288, opubl. byul. № 9, 1995 (in Russian).
11. **Lambakshev A. F., Kotomina V. E., Zelencov S. V., Antonov I. N., Gorshkov O. N.** *Sposob vzryvnoj fotolitografi*. Patent RF № 2610843, opubl. 16.02.2017 (in Russian).
12. **Zhulaj A. P., Kaloeva T. V., Dulimov V. M.** i dr. *Sposob izgotovleniya fotoshablonov*. A.s. SSSR № 1600528, opubl. byul. № 38, 1988 (in Russian).
13. **Lajmen Dzh.** Ispol'zovanie poliimidnykh plenok dlya "vzryvnoj" fotolitografii. *'Elektronika*, 1979, vol. 52, no. 25 (577), URL: <<http://az-design.ru/Support/Archiv/Elc1979/1979n25.shtml>>S.9
14. **Goncharova T. S.** Poliimidnye plenki v kachestve mezhslojnykh izoliruyuschikh i passiviruyuschikh sloev IS, *Zarubezhnaya elektronnaya tehnika*, 1989, no. 8 (339), pp. 53—82 (in Russian).
15. **Skupov A.** Osnovnye svojstva i harakteristiki sovremennoj rezistivnoj elektroplasticheskoy fotolitografii, *Vektor vysokih tehnologij*, 2016, № 8 (29), pp. 26—31 (in Russian).
16. **Smolin V. K., Fomin V. I., Utkin V. P., Malenskaya V. P.** *Sposob izgotovleniya kontaktov na osnove gribidnyh shemah s mnogo-slojnoj metallizacij*. A. s. SSSR 554753, zaregistr. 21.12.1976 (in Russian).
17. **Smolin V. K.** *Kontaktnaya maska*. A.s. SSSR 1082245, zaregistr. 22.11.1983 (in Russian).
18. **Mineeva M. A., Murakaeva G. A.** *Sposob izgotovleniya omicheskikh kontaktov k planarnoj storone struktury s lokal'nymi oblastami nizkolegirovannyh poluprovodnikov gruppy A3V5*. Patent RF № 2084988, opubl. 20.07.1997 (in Russian).
19. **Simakova A. N., Smolin V. K.** *Sposob izgotovleniya rezistivnoj tonkoplenochnoj shemy*. A. S. SSSR № 1279423, zaregistr. 22.08.1986 (in Russian).
20. **Chesnokov V. D.** *Sposob vzryvnoj litografii plenochnykh osetrovkojnykh struktur*. Patent RF № 2400790, opubl. 27.09.2010 (in Russian).
21. **Konta R., Dizen'ya I.** *Sposob vyborochnogo pokrytiya mikroobrabotannoj poverhnosti*. Patent RF № 2334304, opubl. 20.09.2008 (in Russian).
22. **Smolin V. K., Donina M. M.** *Sposob fotolitografii*. Pat. RF № 2096935, opubl. 20.11.1997 (in Russian).
23. **Il'in E. Yu., Zhukov A. A., Popova E. V., Pavlov A. A.** *Sposob fotolitografii*. Patent RF № 2586400, opubl. 10.06.2016 (in Russian).
24. **Bednarzh B., El'cov A. V., Zahoval Ya., Kralichek Ya., Yurre T. A.** *Svetochuvstvitel'nye polimernye materialy*. Pod red. A. V. El'cova, Leningrad, Himiya, 1985, 296 p. (in Russian).
25. **Velikovskij I. E., Dyuzhikov V. I.** Poluchenie submikronnykh zatvorov SVCh-tranzistorov metodom ul'trafioletovoj fotolitografii, *Pribory*, 2009, no. 5, pp. 58—62 (in Russian).
26. **Fedotova Yu. Yu., Anischenko E. V., Ishutkin S. V., Kagadej V. A.** Razrabotka dvuhslojnoj maski s ispol'zovaniem metoda termicheskogo oplavleniya dlya izgotovleniya maketa T-obraznogo zatvora dlinoj 70 nm. *Mokerovskie chteniya. 6-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya po fizike i tehnologii nanostruktur SVCh elektroniki, 20—21 maya 2015 g.* Sbornik trudov. Moscow, NIYaU MIFI, 2015. P. 48 (in Russian).
27. **Ishutkin S. V., Kagadej V. A., Erofeev E. V., Anischenko E. V.** Formirovanie mezh'elementnoj metallizacii GaAs monolitnykh integral'nykh shem na osnove medi, *Mikro`elektronika*, 2015, vol. 44, no. 4, pp. 282—289 (in Russian).
28. **Andreev V. M., Kalyuzhnyj N. A., Lantratov V. M., Soldatenkov F. Yu., Usikova A. A.** *Sposob formirovaniya kontakta dlya nanogeterostruktury foto`elektricheskogo preobrazovatelya na osnove arsenida galliya*. Patent RF № 2 428 766, opubl. 10.09.2011 (in Russian).
29. **Il'kaev D. R., Krivospickij A. D., Okishin A. A., Orlikovskij A. A., Semin Yu. F.** Nestandardnye metody formirovaniya submikronnykh struktur mikro`elektronike, *Mikro`elektronika*, 1996, vol. 25, no. 5, pp. 339—349 (in Russian).
30. **Valiev K. A., Gorbacevich A. A., Krivospickij A. D.** i dr. *Sposob izgotovleniya poluprovodnikovogo pribora s T-obraznym upravlyayuschim elektrodom submikronnoj tolschiny*. Patent RF № 2192069, opubl. 10.07.2000 (in Russian).
31. **Krivospitsky A. D., Okshin A. A., Orlikovsky A. A., Semin Yu. F.** Submicron structures formation with the help of usual photolithography and self-formation method, *Proc. of IPT RAS*. Ed. By A. A. Orlikovsky, 2000, vol. 16, pp. 71—83 (in Russian).
32. **Adams A., Capio C.** Edge Profiles in the Plasma Etching of Polycrystalline Silicon, *J Electrochem. Soc.* 1981, vol. 128, no. 2, pp. 366—370.
33. **Balan N. N., Vasin V. A., Ivashov E. N., L'vov B. G., Nevsikij A. B., Stepanchikov S. V.** Mikro- i nanoinzheneriya v elektronnom mashinostroenii: seriya iz 7 monografij. Nanoinzheneriya tunnel'nykh preobrazovatelej — Ivanovka, izdatel'stvo NII predel'nyh tehnologij, 2012. 200 p. (in Russian).
34. **Erofeev E. V., Kazimirov A. I.** Razrabotka GaAs SVCh-tranzistorov s metallizacij na osnove Al i Cu, *Doklady TUSURa*, 2012, no. 2 (26), chast' 1, dekabr', pp. 47—52 (in Russian).

35. Aleksandrov S., Alekseev A. Submikronnaya kontaktchnaya metallizaciya. Vybor tehnologii, *Nanoindustriya*, 2009, no. 6, pp. 4–7 (in Russian).
36. Bobkov S. G., Kireev V. Yu. Problemy perehoda mikro`elektroniki v substancionometrovuyu oblast' razmerov. Ch.2. Vozmozhnosti nanoimprint litografii i proekcionnoj opticheskoy litografii, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2007, no. 6, pp. 8–18 (in Russian).
37. Bobkov S., Vrublevskij E., Kireev V., Nedzveckij V., Trepalin A., Tompson I., Dojl G., Husnatdinov N., Labrejk D. Vozmozhnosti i osobennosti nanoimprintlitografii dlya proizvodstva integral'nyh mikroshem, *Nanoindustriya*, 2007, no. 3, pp. 26–32 (in Russian).
38. Sreenivasan V., McMackin J., Xu F., Wang D., Steeley N., Resnick D. Using reverse-tone bilayer etching ultraviolet nanoimprintes lithography. *MICRO*, 2005, vol. 23, no. 1, pp. 37–45.
39. Zajcev A. A. Issledovanie i razrabotka metodov formirovaniya ustroystv nano`elektroniki s primeneniem tekhnologii nanoimprint-litografii. Dissertaciya... kandidata tehnicheskikh nauk- Moscow, MI ET, 2014. 125 p. (in Russian).

УДК 621.3.049.776

DOI: 10.17587/nmst.20.141-144

В. Д. Садков, канд. техн. наук, доц., e-mail: sadvd2016@mail.ru;

Е. Н. Коршунова, студент, e-mail: Korshunova_Katua@mail.ru,

Институт радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева (НГТУ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ПОДГОНКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛЕНОЧНОГО РЕЗИСТОРА

Поступила в редакцию 10.10.2017

Построена математическая модель подгонки пленочного резистора, учитывающая ширину лазерной прорези, что важно для современных микроразмерных элементов. Предложен критерий для оценки влияния ширины прорези. Предложенная модель позволяет найти все множество вариантов прорезей, решающих задачу подгонки.

Ключевые слова: пленочный резистор, лазерная подгонка, моделирование

Введение

Пленочные резисторы (ПР) широко используются в гибридных интегральных схемах НЧ, ВЧ и СВЧ диапазонов [1].

Снижение разброса ПР по номинальному сопротивлению обеспечивается лазерной подгонкой [2]. Уменьшение габаритных размеров ПР приводит к необходимости учитывать конечность толщины лазерной прорези. Использование только экспериментальных данных ограниченного объема оказывается недостаточным для полного анализа процесса подгонки. Требуются модельные исследования, которым и посвящена настоящая работа.

Методика построения модели подгонки

Структура ПР с прорезью длиной c и шириной $2f$ приведена на рис. 1, a. Задача решается методом конформных отображений [3]. Многоугольник $M_1 M_2 M_3 M_4 M_5 M_6 M_7 M_8$ в плоскости z отображаем на верхнюю полуплоскость $\text{Im}w \geq 0$ с указанным на рис. 1, b соотношением точек с помощью интеграла Кристоффеля — Шварца [3]:

$$z = A \int_0^w \sqrt{(w^2 - \alpha^2)/(w^2 - \beta^2)(w^2 - 1^2)(w^2 - \gamma^2)} dw, \quad (1)$$

где A — константа отображения.

Константы α , β , γ определяются из системы уравнений

$$f/c = I_1/I_2, \quad f/(a-f) = I_1/I_3; \quad (2)$$

$$I_1 = A \int_0^\alpha \sqrt{(w^2 - \alpha^2)/(\beta^2 - w^2)(1^2 - w^2)(\gamma^2 - w^2)} dw;$$

$$I_2 = A \int_\alpha^\beta \sqrt{(w^2 - \alpha^2)/(\beta^2 - w^2)(1^2 - w^2)(\gamma^2 - w^2)} dw;$$

$$I_3 = A \int_\beta^1 \sqrt{(w^2 - \alpha^2)/(w^2 - \beta^2)(1^2 - w^2)(\gamma^2 - w^2)} dw.$$

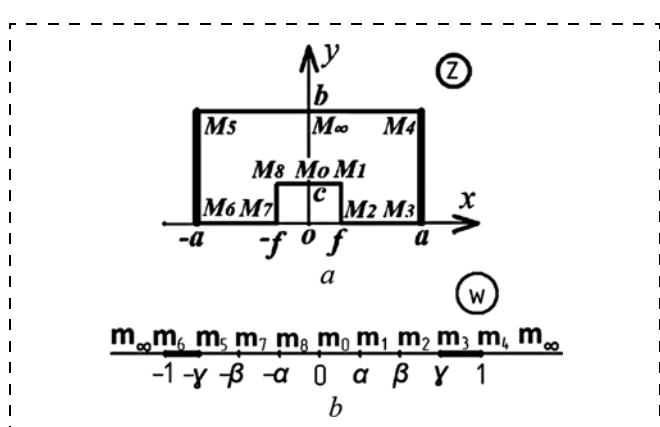


Рис. 1. Прямоугольный резистор с прорезью (a) и его отображение на верхнюю полуплоскость (b)

Fig. 1. A rectangular resistor with a gash (a) and its image on the top semiplane (b)

Гиперэллиптические интегралы $I_1 - I_3$ вычисляются с использованием квадратурных формул наивысшей степени точности после приведения интервалов интегрирования к стандартному интервалу $(-1, 1)$ и выделению особенностей в весовую функцию $1/(1 - w^2)^{1/2}$ [4]:

$$\int_{-1}^1 \frac{g(w)dw}{\sqrt{1-w^2}} \cong \frac{\pi}{N} \sum_{n=1}^N g\left(\cos \frac{2n-1}{2N}\pi\right). \quad (3)$$

Тогда сопротивление R ПР (рис. 1, а) вычисляется по формуле [3]:

$$R_f = 2\rho K(\gamma)/K'(\gamma), \quad (4)$$

где ρ — удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки.

Результаты расчетов нормированного сопротивления $R_n = R_f/(2\rho a/b)$ приведены на рис. 2.

В частном случае узкой прорези ($f = 0$) $\alpha = 0$ и интеграл (1) приводится к виду

$$\begin{aligned} z - (a + ib) &= A \int_1^w \frac{wdw}{\sqrt{(w^2 - \beta^2)(w^2 - 1)(w^2 - \gamma^2)}} = \\ &= \frac{A}{\sqrt{1 - \beta^2}} F\left(\arcsin \sqrt{\frac{w^2 - 1}{w^2 - \gamma^2}}, k\right), \end{aligned} \quad (5)$$

$F(\varphi, k)$ — эллиптический интеграл 1-го рода модуля $k = [(\gamma^2 - \beta^2)/(1 - \beta^2)]^{1/2}$.

Из соответствия точек $z = ib$ и $w = \infty$ получаем

$$A = -\frac{a\sqrt{1-\beta^2}}{K}, \quad (6)$$

где K — полный эллиптический интеграл 1-го рода модуля k .

Обращая (5) и используя далее эллиптические функции Якоби, получаем:

$$\sqrt{\frac{w^2 - 1}{w^2 - \gamma^2}} = \operatorname{sn}\left[\left(1 + \frac{ib - z}{a}\right)K, k\right]. \quad (7)$$

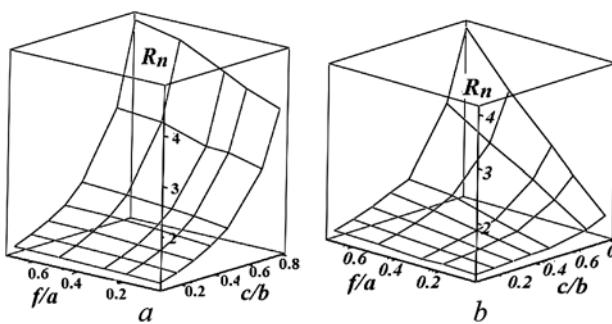


Рис. 2. Зависимость нормированного сопротивления резистора от параметров прорези при $f/a = 0,005; 0,2; 0,3; 0,5; 0,7; 0,8$ и $c/b = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$ при $b/a = 3$ (а) и $b/a = 0,5$ (б)

Fig. 2. Dependence of the reduced resistance of the resistor on the gash parameters at $f/a = 0.005; 0.2; 0.3; 0.5; 0.7; 0.8$ and $c/b = 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8$ at $b/a = 3$ (a) and $b/a = 0.5$ (b)

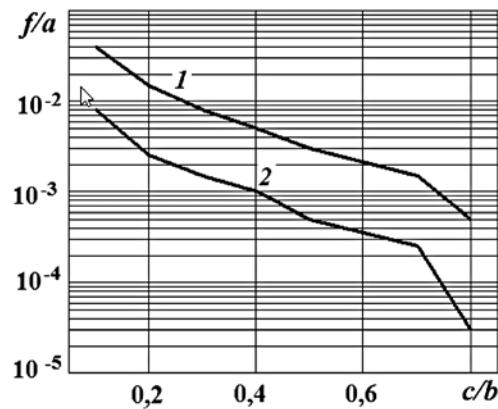


Рис. 3. Влияние нормированной толщины прорези f/a на изменение сопротивления в процентах в зависимости от нормированной длины прорези c/b : 0,1 % (1) и 0,5 % (2)

Fig. 3. Influence of the reduced thickness of the gash f/a on variation of the resistance in percents depending on the reduced length of the gash c/b : 0.1 % (1) and 0.5 % (2)

Из соответствия точек $z = a$ и $w = \gamma$ следует

$$b/a = K'/K, \quad (8)$$

где K' — полный эллиптический интеграл 1-го рода дополнительного модуля $k' = (1 - k^2)^{1/2}$.

Из соответствия точек $z = ic$ и $w = 0$, $z = 0$ и $w = \beta$ с учетом (8) получаем в этом частном случае:

$$\begin{aligned} \gamma &= \gamma_0 = \operatorname{dn}[(1 - c/b)K', k'], \\ \beta &= \beta_0 = \gamma \operatorname{sn}[(c/b)K', k']. \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда для (4) получаем окончательно

$$R_0 = 2\rho \frac{K\{\operatorname{dn}[(1 - c/b)K', k']\}}{K'\{\operatorname{dn}[(1 - c/b)K', k']\}}. \quad (10)$$

Степень влияния толщины прорези $2f$ для произвольного прямоугольного резистора можно оценить по соотношению, полученному из (4) и (10):

$$\frac{R_f}{R_0} = \frac{K(\gamma)}{K'(\gamma)} \frac{K\{\operatorname{dn}[(1 - c/b)K', k']\}}{K'\{\operatorname{dn}[(1 - c/b)K', k']\}},$$

где R_f и R_0 — сопротивления, вычисленные с учетом и без учета ширины прорези; γ — определяется из системы уравнений (2) при заданных размерах a , b и c .

Соотношение $(R_f/R_0 - 1)100$ показывает в процентах изменение сопротивления резистора с прорезью длиной c за счет ее ширины. Результаты таких расчетов при $b/a = 0,3$ для 0,5 % (кривая 1) и 0,1 % (кривая 2) приведены на рис. 3.

При конечной толщине лазерной прорези задача подгонки имеет множество решений, которые легко определяются. Для этого из соотношения (4) по заданному отношению $R/(2\rho)$ находим γ . Здесь R — требуемое значение сопротивления ПР. Все

множество вариантов прорезей получается при выборе параметров α и β из условия $0 \leq \alpha < \beta < \gamma$.

Заключение

Методом конформных отображений построена математическая модель подгонки прямоугольного микроразмерного пленочного резистора с учетом ширины лазерной прорези. Получено соотношение, позволяющее оценить степень влияния ширины прорези и определить необходимость ее учета в конкретном случае. Предложенная модель позволяет найти все множество вариантов прорезей, обеспечивающих процесс подгонки. Работоспособность модели подтверждена расчетами в программном комплексе ELCUT [5] и эксперимента-

ми на образцах резисторов с габаритными размерами 0402 и 0201.

Список литературы

- Лугин А. Н. Конструкторско-технологические основы проектирования тонкопленочных прецизионных резисторов. Пенза: ИИЦ ПГУ, 2008. 287 с.
- Антонов Ю. Н. Проектирование средств регулирования в методе лазерной подгонки. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 134 с.
- Ямпурин Н. П., Широков Л. В., Садков В. Д., Потехин В. А. Современные проблемы радиоэлектроники с позиций теории конформных отображений. Арзамас: АГПИ, 2014. 209 с.
- Крылов В. И. Приближенное вычисление интегралов. М.: Наука, 1967. 500 с.
- www.tor.ru

V. D. Sadkov, Associate Professor, sadvd2016@mail.ru, **E. N. Korshunova**, Student,
Institute of Radio Engineering and Information Technologies, R. Y. Alekseev
Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation

Corresponding author:

Sadkov Viktor D., Associate Professor, Institute of Radio Engineering and Information Technologies, R. Y. Alekseev
Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: sadvd2016@mail.ru

Process Modeling of Laser Trimming of Resistance of the Film Resistor

Received on October 10, 2017
Accepted on November 22, 2017

The mathematical model of adjustment of the film resistor is constructed. The mathematical model considers the width of a laser gash that is important for microsized elements. The criterion for a gash width impact assessment is offered. The offered model allows to find all the solutions of the problem.

Keywords: film resistor, laser trimming, modeling

For citation:

Sadkov V. D., Korshunova E. N. Process Modeling of Laser Trimming of Resistance of the Film Resistor, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 141–144.

DOI: 10.17587/nmst.20.141-144

Introduction

Film resistors (FR) are used in hybrid integrated circuits of LF, HF and SHF ranges [1].

Decrease of the spread of FR by the nominal resistance is ensured by a laser trimming (adjustment) [2]. Reduction of the dimensions of FR leads to a necessity to consider the finiteness of the thickness of a laser gash. Use of only experimental data because of their limited volume is not enough for a full analysis of the adjustment process. Modeling researches are required, to which the present work is devoted.

Technique for construction of the trimming model

An FR structure with a gash of the length c and width $2f$ is presented in fig. 1, a. The task is solved by the method of conformal images [3]. A polygon of $M_1M_2M_3M_4M_5M_6M_7M_8$ in plane z is displayed on the

top semiplane of $\text{Im}w \geq 0$ with the conformity of the points specified in fig. 1, b by means of the Schwarz–Christoffel integral [3]:

$$z = A \int_0^w \sqrt{(w^2 - \alpha^2)/(w^2 - \beta^2)(w^2 - 1^2)(w^2 - \gamma^2)} dw, \quad (1)$$

where A — image constant.

Constants α, β, γ are defined from the following system of equations

$$f/c = I_1/I_2, \quad f/(a-f) = I_1/I_3, \quad (2)$$

$$I_1 = A \int_0^\alpha \sqrt{(w^2 - \alpha^2)/(\beta^2 - w^2)(1^2 - w^2)(\gamma^2 - w^2)} dw,$$

$$I_2 = A \int_\alpha^\beta \sqrt{(w^2 - \alpha^2)/(\beta^2 - w^2)(1^2 - w^2)(\gamma^2 - w^2)} dw,$$

$$I_3 = A \int_{\beta}^{\gamma} \sqrt{(w^2 - \alpha^2)/(w^2 - \beta^2)(1^2 - w^2)(\gamma^2 - w^2)} dw.$$

The hyperelliptic integrals $I_1 - I_3$ are calculated with the use of the quadrature formulas of the highest degree of accuracy after the integration intervals are brought to a standard interval $(-1, 1)$ and the specific features are singled out in the weight function $1/(1 - w^2)^{1/2}$ [4]:

$$\int_{-1}^1 \frac{g(w)dw}{\sqrt{1 - w^2}} \cong \frac{\pi}{N} \sum_{n=1}^N g\left(\cos \frac{2n-1}{2N}\pi\right). \quad (3)$$

Then resistance R of FR (fig. 1, a) is calculated under the following formula [3]:

$$R_f = 2\rho K(\gamma)/K'(\gamma), \quad (4)$$

where ρ — specific surface resistance of a resistive film.

The results of the calculations of the reduced resistance $R_n = R_f/(2\rho a/b)$ are presented in fig. 2.

In a particular case of a narrow gash ($f = 0$) $\alpha = 0$ and integral (1) is brought to the following form:

$$\begin{aligned} z - (a + ib) &= A \int_1^w \frac{wdw}{\sqrt{(w^2 - \beta^2)(w^2 - 1)(w^2 - \gamma^2)}} = \\ &= \frac{A}{\sqrt{1 - \beta^2}} F\left(\arcsin \sqrt{\frac{w^2 - 1}{w^2 - \gamma^2}}, k\right), \end{aligned} \quad (5)$$

$F(\phi, k)$ — elliptic integral of the 1st kind of the module $k = [(\gamma^2 - \beta^2)/(1 - \beta^2)]^{1/2}$.

From the conformity of the points $z = ib$ and $w = \infty$ we get

$$A = -\frac{a\sqrt{1 - \beta^2}}{K}, \quad (6)$$

where K — a full elliptic integral of the 1st kind of module k .

By inverting (5) and using further the elliptic Jacobian functions, we get:

$$\sqrt{\frac{w^2 - 1}{w^2 - \gamma^2}} = \operatorname{sn}\left[\left(1 + \frac{ib - z}{a}\right)K, k\right]. \quad (7)$$

From conformity of the points $z = a$ and $w = \gamma$ it follows that

$$b/a = K'/K, \quad (8)$$

where K' — a full elliptic integral of the 1st kind of the additional module $k' = (1 - k^2)^{1/2}$.

From the conformity of the points $z = ic$ and $w = 0$, $z = 0$ and $w = \beta$ with account of (8) in this particular case we get:

$$\begin{aligned} \gamma &= \gamma_0 = \operatorname{dn}[(1 - c/b)K', k'], \\ \beta &= \beta_0 = \gamma \operatorname{sn}[(c/b)K', k'], \end{aligned} \quad (9)$$

then for (4) we get

$$R_0 = 2\rho \frac{K\{\operatorname{dn}[(1 - c/b)K', k']\}}{K'\{\operatorname{dn}[(1 - c/b)K', k']\}}. \quad (10)$$

The degree of the influence of the gash thickness of $2f$ for a derived rectangular resistor can be estimated by the correlation received from (4) and (10):

$$\frac{R_f}{R_0} = \frac{K(\gamma)}{K'(\gamma)} \frac{K'\{\operatorname{dn}[(1 - c/b)K', k']\}}{K\{\operatorname{dn}[(1 - c/b)K', k']\}},$$

where R_f and R_0 — the resistances calculated with the account of the gash width and without it; γ is defined from the system of equations (2) at the set sizes of a , b and c .

The correlation of $(R_f/R_0 - 1) \cdot 100$ shows in percents the variation of the resistance of the resistor with the gash length c due to its width. The results of such calculations at $b/a = 0.3$ for 0.5 % (curve 1) and for 0.1 % (curve 2) are presented in fig. 3.

At the final thickness of the laser dash the adjustment problem has many solutions, which are defined easily. For this purpose from the correlation (4) by the set correlation $R/(2\rho)$ we find γ . Here R — the required value of the FR resistance. All the numerous dash versions are found during selection of the parameters of α and β from the condition $0 \leq \alpha < \beta < \gamma$.

Conclusion

The method of the conformal images is used for construction of a mathematical model for adjustment of the rectangular microdimensional film resistor taking into account the width of the laser gash. A correlation is received allowing us to estimate the degree of the influence of the gash width and to determine the necessity of its account in a concrete case. The offered model allows us to find all the numerous versions of the gashes ensuring the adjustment process. The operability of the model is confirmed by the calculations done in ELAGASH software [5] and by the experiments on the samples of the resistors with dimensions of 0402 and 0201.

References

1. **Lugin A. N.** *Konstruktorsko-tehnologicheskie osnovy proektirovaniya tonkoplenochnyh precizionnyh rezistorov*, Penza: IIC PGU, 2008. 287 p. (in Russian).
2. **Antonov Ju. N.** *Proektirovanie sredstv regulirovaniya v metode lazernoj podgonki*. Ul'janovsk: Ul'janovskiy universitet, 2007. 134 p. (in Russian).
3. **Jampurin N. P., Shirokov L. V., Sadkov V. D., Potekhin V. A.** *Sovremennye problemy radioelektroniki s pozicij teorii konformnyh otobrazhenij*. Arzamas: AGPI, 2014. 209 p. (in Russian).
4. **Krylov V. I.** *Priblizhennoe vychislenie integralov*, Moscow, Nauka, 1967. 500 p. (in Russian).
5. www.tor.ru (in Russian).

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

УДК 621.785

DOI: 10.17587/nmst.20.145-157

С. В. Акимов¹, канд. техн. наук, доц., akimov-sv@yandex.ru, **М. Я. Афанасьев²**, канд. техн. наук, доц., amax@niuitmo.ru, **Н. П. Меткин³**, д-р техн. наук, проф., исполнительный директор, metkin010843@yandex.ru, **Ю. В. Федосов²**, канд. техн. наук, доц., yf01@yandex.ru

¹ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

³ Кластер "Развитие информационных технологий, радиоэлектроники, приборостроения, средств связи и инфотелекоммуникаций Санкт-Петербурга"

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКОСТНЫХ ЗАГОТОВОВОК ДЛЯ МЭМС

Поступила в редакцию 03.07.2017

Представлен новый подход к оптимизации траектории движения лазерного луча во время лучевой обработки на станке с ЧПУ плоскостной заготовки произвольной формы по кривой. Предложено два метода снижения времени обработки, один из которых предполагает увеличение скорости обработки путем гладкого сопряжения кривых разгона-торможения, а второй — снижение пути вспомогательных переходов с помощью генетического алгоритма. Предлагаемый подход позволяет уменьшить время обработки на 25—30 %.

Ключевые слова: лазерная обработка, ЧПУ, оптимизация траектории, генетические алгоритмы, задача коммивояжера, высокоскоростная обработка, гладкое сопряжение кривых разгона-торможения

Введение

Современное производство не может обойтись без новых технологий и использования высокоточного оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ). С конца семидесятых годов прошлого века такое оборудование непрерывно совершенствовалось, и сейчас в нашем распоряжении имеются такие устройства, как 3D-принтеры, 3D-сканеры, автоматизированные сборочные линии, лазерные гравировщики, маркировщики, а также гибридные и адаптивные технологические системы [1].

Разработка и исследование алгоритмов работы станка с ЧПУ является сложной задачей, включающей в себя задачу сокращения времени обработки сообразно программным и аппаратным возможностям оборудования и механическим характеристикам их двигателей [2, 3]. Как следует из работ [4, 5], оптимизация траектории может быть одной из главных задач, решение которой затрагивает производительность и качество выпускаемой продукции.

Отметим, что любое технологическое оборудование с ЧПУ имеет механизм, который перемещает оконечное устройство вдоль определенной траектории. Разумеется, его эффективность (особенно продолжительность времени обработки) зависит от скорости перемещения механизма и его траектории перемещения. Очевидно, что возможности компонентов оборудования обусловливают главный критерий производительности системы — снижение времени обработки. Это ложится в основу задачи формирования траектории перемещения в ходе лучевой обработки.

В общем виде процесс построения траектории состоит в построении графика зависимости траектории от времени, за которое оконечное устройство движется вдоль нее. Соответственно, траектория обычно выражается как параметрическая функция от времени, значение которой в каждый момент времени соответствует определенному положению оконечного устройства [6]. Очевидно, что, определив эту функцию, необходимо рассмотреть

реть особенности ее использования. В большинстве случаев станочной обработки траектория инструмента задается САМ-программой автоматически. Основных факторов, влияющих на качество обработки, два — это управление геометрией траектории и управление кинематическими параметрами станка. Также эти факторы влияют на производительность оборудования [7]. В то время как большинство существующих алгоритмов расчета подачи основываются на скорости и ускорении как на основных факторах надежности, использование динамических состояний высшего порядка, таких как рывок, делает расчет и оптимизацию подачи весьма сложной задачей [8].

Основная проблема — это увеличение подачи при одновременном сохранении точности обработки, при соблюдении ограничений по ускорениям, накладываемых станком [4]. При построении траектории должны быть учтены скорости, ускорения и рывки в процессе ее обхода.

При этом задача в общем виде сводится к нахождению траекторий, близких к оптимальным, которые соответствуют определенным критериям (например, наименьшему времени прохождения) [3]. Существуют два основных метода построения траектории — с использованием сетевых технологий либо без них. Построение траектории с использованием сетевых технологий предполагает адаптивную разработку траектории движения в ходе выполнения программы, а без сетевых технологий — предварительную обработку программы для ЧПУ в целях поиска неразрывных путей и сокращения вспомогательных переходов. Такой подход может быть использован при обработке заготовок по сложным траекториям, состоящим из большого числа отдельных линий.

Например, при распечатывании на 3D-принтере крупногабаритных деталей с различными поддерживающими структурами внутри, или при вырезании из листа большого числа неодинаковых деталей, или при изготовлении деталей с большим числом отверстий на плоскости.

Экспериментальная установка для обработки излучением подложек МЭМС

Для МЭМС часто необходимо изготовление деталей на подложке, в частности сложной формы, содержащих массивы разнородных элементов, сложных лекальных форм и т. д. В серийном производстве это требует нескольких технологических операций, производимых на различных режимах обработки. Однако на этапе изготовления макета МЭМС воздействование всей технологической цепочки экономически нецелесообразно. Таким образом, необходимо спроектировать установку, позволяющую объединить несколько операций

по засвечиванию фотополимера без использования фотошаблона, отжига, микросварки, раскроя, т.е. создать аналог макетно-стендовой лаборатории для микроустройств в рамках одной системы с числовым программным управлением [9—10].

В настоящей работе рассматривается устройство (рис. 1), предназначенное для лазерной обработки плоскостных заготовок лазерным излучением. Оно состоит из неподвижного стола, на котором размещается объект, перемещающейся в двух координатах лазерной головки, расположенной над столом, и источника лазерного излучения, оптически сопряженного с лазерной головкой [11—13]. На примере данного устройства будут рассмотрены различные методы оптимизации траектории движения лазерной головки в процессе обработки.

Эксперимент проводили с применением подложки, покрытой фотополимером. Экспериментально было показано, что при использовании источника небольшой мощности (использовали твердотельный лазер с длиной волны 405 нм и мощностью 500 мВт) скорость перемещения лазерной головки незначительно влияла на качество обработки полимера.

На рис. 2 показан один из экспериментальных образцов. Он выполнен из фольгированного стеклотекстолита марки СТФ-2, покрытого фотополимером POSITIV20. В ходе эксперимента после обработки образец был помещен в 1 %-й раствор гидроксида натрия, а затем протравлен в концентрированном растворе хлорного железа, чтобы удалить медью с засвеченных участков. Следует отметить, что в диапазоне скоростей 500...950 мм/мин линии, оставленные лазерным лучом, имеют практически одинаковую толщину. Это указывает на то, что возможно дальнейшее увеличение скорости обработки одновременно с сохранением плотности излучения, достаточной для обработки фотополимера.

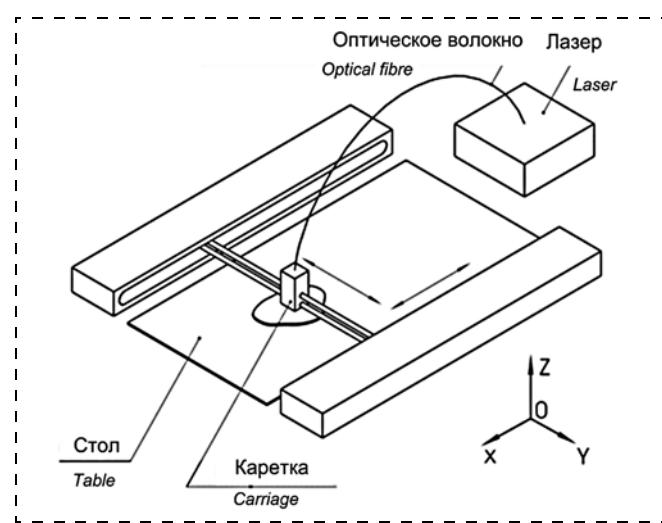


Рис. 1. Экспериментальное устройство для лазерной обработки
Fig. 1. Experimental device for laser processing

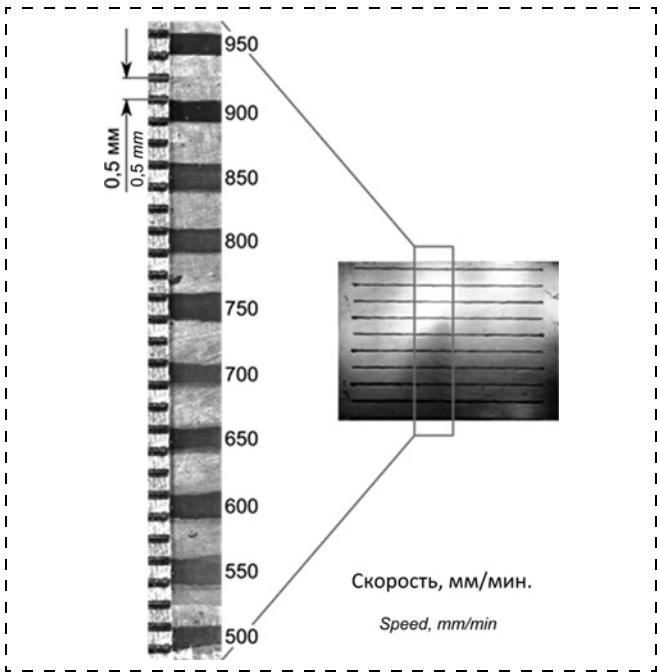


Рис. 2. Следы обработки лазерным лучом

Fig. 2. Traces of laser beam processing

Другими словами — селективное отверждение полимеров может рассматриваться как высокопроизводительная обработка материалов, соответственно, траектория обработки должна быть оптимизирована для работы на максимальной скорости.

Основные способы оптимизации траектории

Основополагающая задача оптимизации — это достижение максимальной скорости обхода траектории. Каждая программа для ЧПУ представляет собой последовательность команд, большинство из которых описывают перемещение инструмента. Следовательно, траектория инструмента — это последовательность сегментов. В станках с ЧПУ реализована линейная и круговая интерполяции, так что сегменты представляют собой линии и дуги. Для каждой команды или кадра устанавливается подача, и стандарт ISO 6983-1:2009 [14] не оговаривает, что на каждом из описанных в кадре сегментов станок должен разгоняться до максимальной скорости.

В ходе экспериментов было доказано, что механические характеристики двигателей не позволяют системе достичь максимальной скорости подачи при обходе траектории. Кроме того, ни один двигатель не может начать работу на максимальной частоте вращения и одновременно выдать соответствующий максимальный крутящий момент. Для каждого типа двигателей, использующихся в станках с ЧПУ, существует зависимость частоты вращения от времени, иначе говоря, кривая разгона-торможения. В общем виде эта кривая представлена в виде трапеции: вначале двигатель раз-

гоняется до момента набора необходимой скорости, затем происходит движение при постоянном значении скорости, а в конце он линейно замедляется. Проблема состоит в том, что значение подачи не связано с длиной кадра.

Таким образом, на коротких сегментах траектории, когда замедление движения начинается сразу после ускорения, трапециевидный график вырождается в треугольный и станок не может достичь максимального значения скорости обработки. Очевидно, что при обходе траектории, составленной из множества коротких кадров, от кадра к кадру исполнительный механизм будет двигаться рывками. Это вызывает вибрации и ускоряет изнашивание двигателей и прочих движущихся частей [15].

Предлагается следующий подход к оптимизации траекторий в ходе обработки заготовки на станке с ЧПУ.

1. Реализация алгоритма двухпроходного анализа управляющей программы. На первом проходе будут оцениваться общие характеристики траектории, такие как длина сегментов и минутная подача на каждом из них, после чего вся траектория будет разбита на равные блоки. На втором этапе будет создан буфер, в который будут помещены блоки, для них необходимо рассчитать параметры кривых разгона-торможения с учетом их сопряжения. Размер буфера может изменяться и зависит от максимальной скорости, заданной в управляющей программе. Таким образом, в буфер будет помещено такое число блоков, которое необходимо для возможности остановки двигателя в штатном режиме (то есть без превышения максимальных для установки значений ускорения и рывка). Подобный подход позволит исполнительному механизму плавно разгоняться в течение нескольких блоков для достижения заданной контурной скорости.

2. Переход от трапециoidalной кривой разгона-торможения к двойной S-образной (рис. 3). По

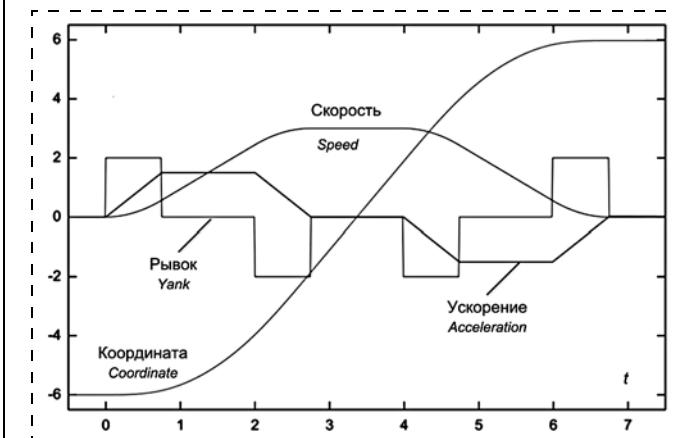


Рис. 3. Общий вид кривых движения, скорости, разгона и торможения для двойной S-образной траектории

Fig. 3. General view of the curves of movement, speed, acceleration and deceleration for a double S-shaped trajectory

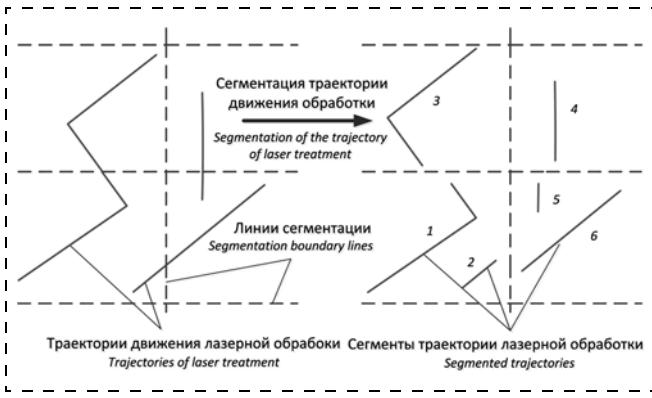


Рис. 4. Способ сегментации траектории
Fig. 4. Method of the trajectory segmentation

результатам проведенных испытаний сделан вывод о том, что подобная траектория позволяет оптимизировать не только вторую производную координаты по времени (ускорение), но и третью — рывок. Наличие контролируемого рывка позволяет более гибко управлять параметрами разгона и торможения на коротких кадрах, а также снизить нагрузку на механические части оборудования [16, 17].

Помимо оптимизации траектории в режиме реального времени, существует другая основная задача — оптимизация траектории перед запуском программы на станке. Для сокращения времени обработки могут быть выделены три подхода:

- поиск наиболее продолжительного непрерывного участка траектории без острых углов, на котором оконечное устройство (каретка стола) успеет разогнаться до максимально возможной скорости с учетом ограничений максимальных ускорения и рывка;
- минимизация вспомогательных ходов, когда каретка движется при выключенном источнике излучения;
- комбинация первых двух подходов, позволяющая найти максимально протяженную траекторию без острых углов, включающую в себя как рабочие, так и вспомогательные ходы с учетом небольшого времени включения и выключения лазерного излучения.

Предлагается следующее решение. Вначале на площадь, ограничивающую область обработки, накладывается координатная сетка с заданным шагом разбиения. Траектория, заданная координатами узлов и множеством ребер, разбивается на сегменты, которые нумеруются и помещаются в список. Каждый сегмент в списке содержит информацию о направлении обхода траектории, а их порядок в списке определяет порядок обхода. Суммарное время обхода траектории состоит из времени, затрачиваемого на обход всех сегментов, когда лазер включен, и времени, затрачиваемого на вспомога-

тельные переходы, когда лазер выключен и движение осуществляется на максимальной скорости (рис. 4).

Каждый сегмент может быть представлен как

$$S(i) \stackrel{\text{def}}{=} \langle x_a, y_a, x_b, y_b, l, d, i, j, v, t \rangle, \quad (1)$$

где x_a, y_a, x_b, y_b — координаты начала и конца сегмента (точки a и b) соответственно; l — длина сегмента; v — скорость прохождения сегмента; t — время, затрачиваемое на прохождение сегмента; d — направление прохождения сегмента; i — идентификатор сегмента; j — номер сегмента в очереди обработки. Номера сегментов определяют последовательность их обработки. Список сегментов полностью определяет траекторию обработки:

$$\text{List} \stackrel{\text{def}}{=} \langle S_{(i, j)} \rangle, \quad i, j \in \overline{1, n}, \quad (2)$$

где i — идентификатор сегмента; j — номер сегмента в списке, задающий очередь обработки; n — число сегментов. Тогда время, затрачиваемое на обработку

$$T = T_p + T_{idle}, \quad (3)$$

где T_p — время, затрачиваемое на обработку (рабочие ходы); T_{idle} — время, необходимое для перемещения от базовой точки до первого сегмента и от последнего сегмента до базовой точки, т.е. время, затрачиваемое на вспомогательные перемещения каретки.

Далее задача оптимизации может быть представлена как поиск последовательности сегментов обработки и их ориентации (начала и конца участка, где включается и выключается лазер), когда время работы с выключенным лазером будет минимальным. Поскольку время, затрачиваемое на обработку сегментов, не зависит от последовательности их обработки, задача сводится к минимизации только времени T_{idle} .

Принимая во внимание тот факт, что двигатели, перемещающие лазерную головку в двух координатах, могут двигаться независимо друг от друга, время холостого хода между двумя активными участками будет пропорционально максимальному приращению для каждой оси:

$$T_{x(i)} = k_{\max}(|x_a - x_b|, |y_a - y_b|). \quad (4)$$

Общее время, затрачиваемое на вспомогательные ходы, будет равно

$$T_x = \sum_i T_{x(i)}, \quad i \in \overline{1, n}. \quad (5)$$

Эта задача может быть решена с использованием генетических алгоритмов [18]. Генетические алгоритмы широко используются при разработке и оптимизации программ для ЧПУ. В частности, в

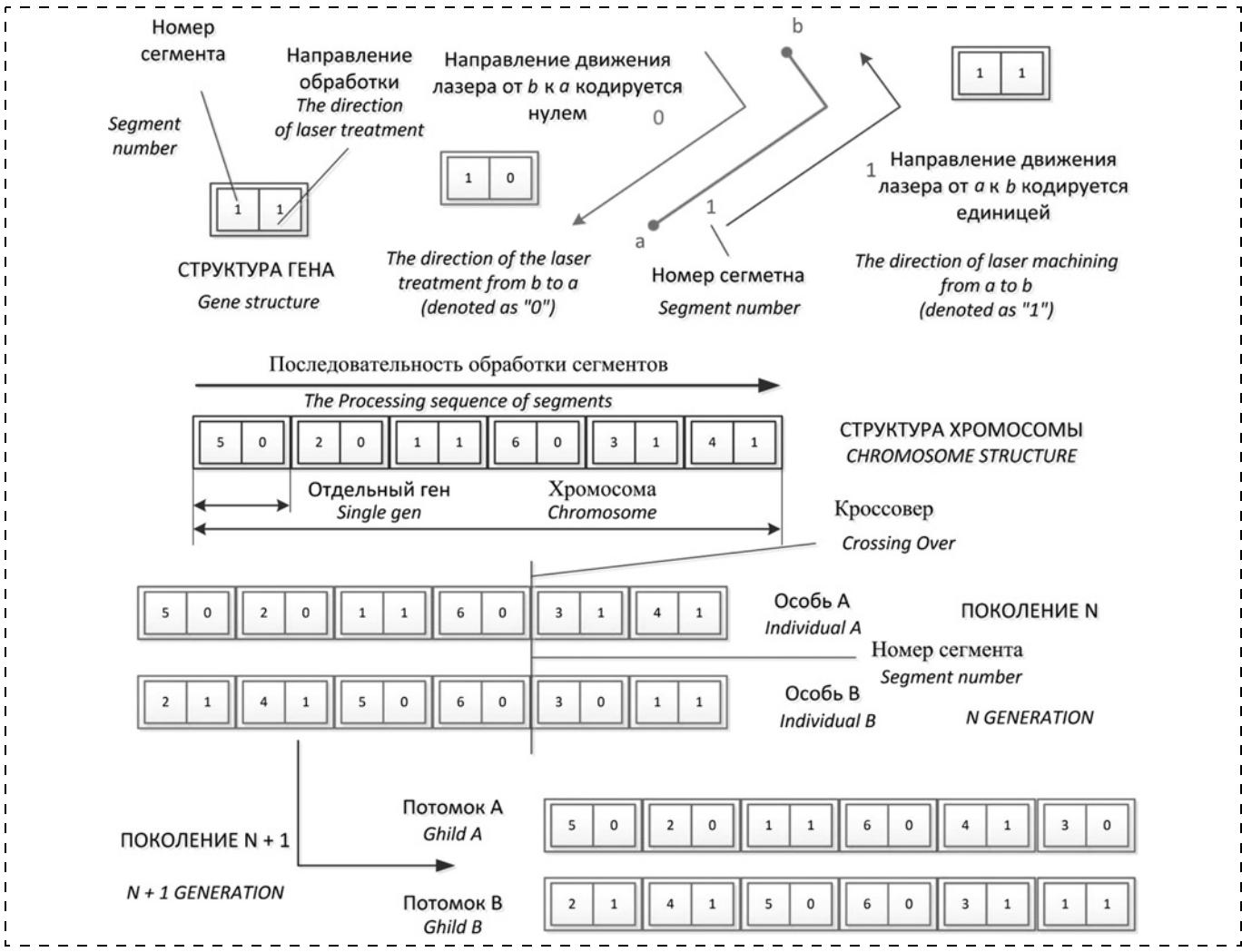


Рис. 5. Генетическое моделирование оптимизации траектории при лучевой обработке
Fig. 5. Genetic modeling of the trajectory optimization in case of beam processing

работе [19] описано их использование для разработки методики сортировки без доминирования (NSGA-II) и построения фронта частотного распределения для создания многокритериального метода оптимизации параметров обработки (глубины реза, подачи и скорости) при работе на токарном станке.

Работа [20] посвящена задачам применения генетических алгоритмов в автоматизированной технологической подготовке производства (АСТПП). Другими словами, для систематической формализации методов обработки (относительно технологических операций, обработки, инструмента и т.д.) в целях улучшения экономических и производственных параметров производства изделий. В своей работе Вонг [21] провел исследование проблем применения генетических алгоритмов совместно с нейросетью для определения оптимальных параметров обработки для гибридного многопозиционного полировального станка. Тарох и Жэнь в своей работе [22] представили основанный на генетичес-

ком алгоритме способ отслеживания движения избыточных и неизбыточных манипуляторов в режиме реального времени.

В данной статье предлагается следующее решение. Хромосома будет состоять из генов, описывающих последовательность прохождения сегментов и их ориентацию, определяющих направление обработки (рис. 5). Для того чтобы определить направление и траекторию перемещения лазерного луча вдоль сегмента, каждый ген содержит информацию о номере сегмента и направлении обработки. В случае, если луч движется от *a* до *b*, направление кодируется нулем, если оно обратное — единицей. Последовательность генов в хромосоме определяет последовательность лучевой обработки каждого из сегментов, таким образом хромосома кодирует определенным образом траекторию лазерной обработки изделия.

В дальнейшем для всех генов, входящих в хромосому, необходимо использовать кроссинговер. Если это условие не будет соблюдаться, то некото-

рая часть подлежащих обработке сегментов не будет обработана, в то время как некоторые из них будут обработаны дважды. Подобный тип кроссинговера был изучен и применен для решения задачи

коммивояжера с использованием генетических алгоритмов. Простейшая форма оператора кроссинговера показана на рис. 5. Оператор мутации может работать с направлением обработки сегмента и

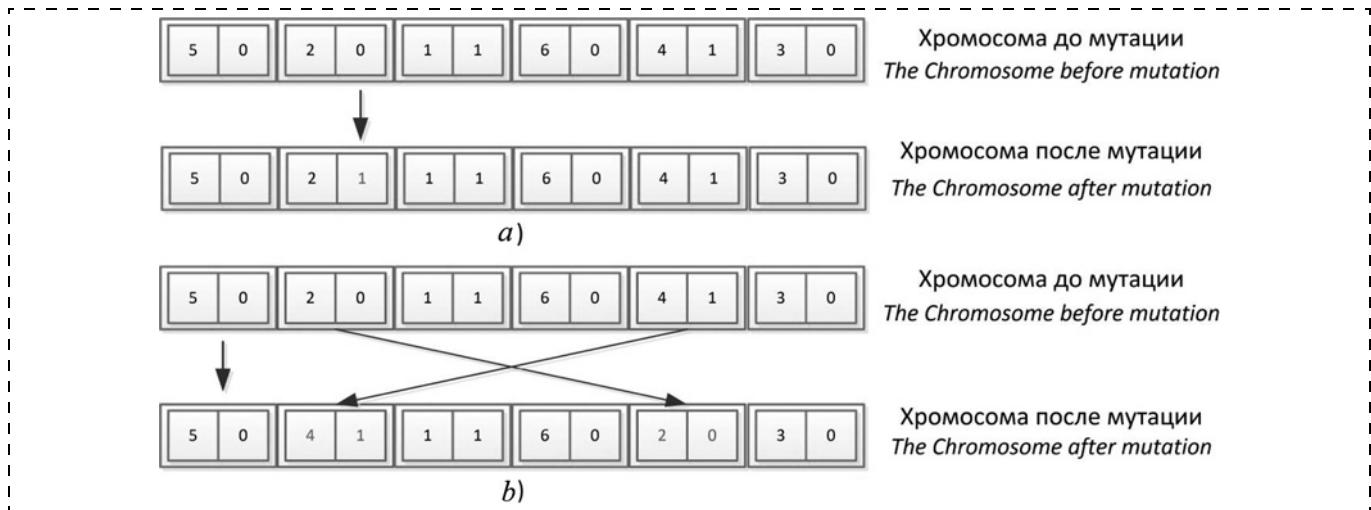


Рис. 6. Типы мутаций: а — с изменением направления прохождения сегмента; б — с изменением последовательности прохождения сегмента

Fig. 6. Types of mutations: a — with a change of the direction of the segment passage, b — with a change of the sequence of the segment passage

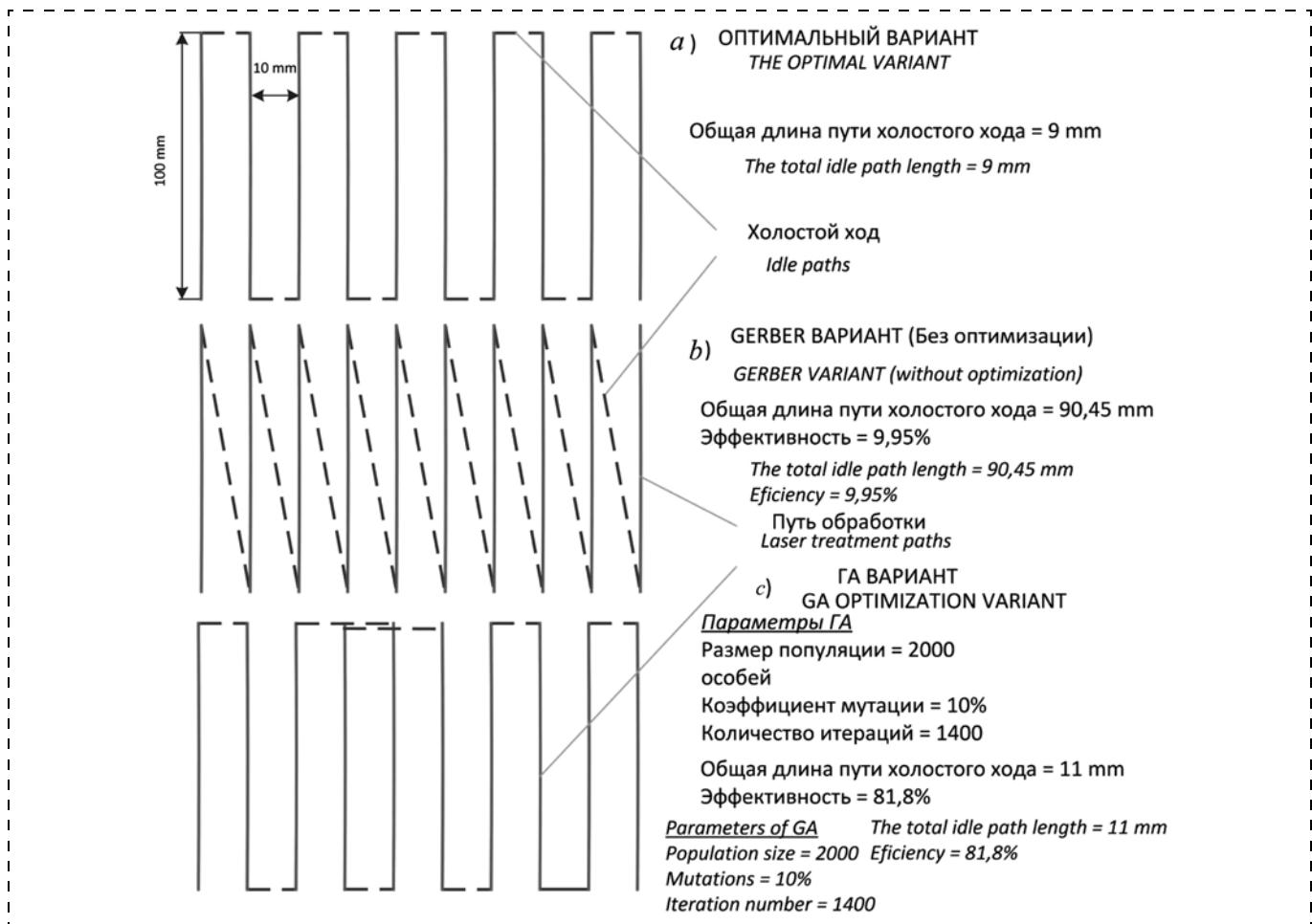


Рис. 7. Результаты моделирования

Fig. 7. Results of modeling

с перестановкой отдельных сегментов (рис. 6). Такой кроссинговер будет близок к используемому при решении задачи коммивояжера [23, 24], за исключением добавления направления прохождения сегмента.

Поскольку генетические алгоритмы доказали свою эффективность при решении задачи коммивояжера, это позволяет предположить эффективность применения данной стратегии для решения задачи оптимизации траектории движения при обработке излучением [25–27]. Для повышения эффективности алгоритма можно применить эвристику, заключающуюся в изменении ориентации соседнего сегмента таким образом, при котором расстояние между концами сегмента, а следовательно, и путь вспомогательного хода будут минимальными.

Также возможно применение эвристического метода последовательного улучшения прототипа [28], объединенного с методом глобального адаптивного случайного поиска, предложенного профессором кафедры статистического моделирования Санкт-Петербургского государственного университета Ю. А. Сушковым [29], который используется следующим образом. Сначала случайным образом генерируется множество решений, из которых отбирается конечное множество n наилучших. Далее, эти решения модифицируются путем применения перестановок. Из полученных решений вновь отбирается n наилучших, причем от итерации к итерации диапазон (расстояние Хэмминга) сокращается. После заданного числа итераций для каждого из решений запускается процесс совершенствования прототипа. Результаты моделирования данного подхода представлены на рис. 7.

Заключение

Были рассмотрены подходы к построению оптимальной траектории для исполнительного механизма станка. В качестве основного критерия оптимизации было использовано время обработки. Были предложены два основных подхода: увеличение скорости обработки за счет плавного сопряжения кривых разгона-торможения и сокращения числа вспомогательных переходов. Эксперименты показали, что возможно значительное сокращение времени обработки, когда контроллер ЧПУ выполняет разгон и торможение вдоль следующих друг за другом участков, которые были предварительно выбраны и сохранены в буфере.

Для сокращения числа вспомогательных переходов был разработан генетический алгоритм с модифицированной эвристикой, базирующейся на алгоритме для решения задачи коммивояжера. Предложенные методы оптимизации траектории исполнительного механизма при обработке излу-

чением способны уменьшить приемы обработки и повысить эффективность технологического оборудования. В настоящее время созданы экспериментальная установка и универсальная программная библиотека, которая объединяет описанные алгоритмы и позволяет вычислить параметры оптимизации.

На тестовом примере эффективность установки, работающей по траектории, полученной с помощью предложенного метода, составила 81,8 % от оптимального варианта. Для сравнения, для тех же тестовых данных эффективность траектории, полученной программой без оптимизации, составила всего 9,95 %. Можно предположить, что в условиях промышленного производства предлагаемый подход обеспечит повышение эффективности от 25 до 30 %.

Список литературы

1. Афанасьев М. Я., Грибовский А. А. Концепция адаптивной платформы технологического оборудования // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 268–272. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-268-272.
2. Qiang Z., Li S.-R. Efficient computation of smooth minimum time trajectory for CNC machining // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. 68 (1). P. 683–692.
3. Torsten K. Literature Survey: Trajectory Generation in and Control of Robotic Systems. Berlin Heidelberg: Springer, Berlin, 2010 P. 11. C. 31.
4. Li X. Z., Rui Y. S., Xiao S., Li H. B. High speed interpolation for microline trajectory and adaptive real-time lookahead scheme in CNC machining. Science China Technological Sciences. 2011. 54 (6). P. 1481–1495.
5. Chunming Y., Ke Z., Wei F. Time-optimal interpolation for CNC machining along curved tool paths with conned chord error // Journal of Systems Science and Complexity. 2013. 26 (5). P. 836–870.
6. Biagiotti L., Melchiorri C. Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots. Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
7. Beudaert X., Lavernhe S., Tournier C. Direct trajectory interpolation on the surface using an open CNC // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014, 75 (1). P. 535–546.
8. Bharathi A., Dong J. Feedrate optimization for smooth minimum-time trajectory generation with higher order constraints // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. 82 (5). P. 1029–1040.
9. Раткин Л. С. Современные технологии проектирования, конструирования и производства нано- и микроэлектромеханических систем // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 3. С. 2–5.
10. Васильев В. Ю. Тренды развития технологий и производства компонентов и узлов микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 7. С. 403–415.
11. Afanasyev M. Y., Fedosov Y. V., Nemkova A. A. Designing features of power optical units for technological equipment // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2015. Vol. 16, N. 2 (102), P. 244–250. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-244-250.
12. Афанасьев М. Я., Федосов Ю. В. Патент РФ № 161667. Устройство для обработки лазерным излучением поверхности произвольной формы / Опубл. 27.04.2016. Бюл. № 12.

13. Афанасьев М. Я., Федосов Ю. В. Патент РФ № 2583163. Оптико-механическая система / Опубл. 10.05.2016. Бюл. № 13.
14. ISO 6983-1:2009 (en): Automation systems and integration. Numerical control of machines. Program format and definitions of address words. Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems.
15. Lin W., Cao J. A look-ahead and adaptive speed control algorithm for high-speed CNC equipment. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63 (5). P. 705–717.
16. Wang L., Cao J. F., Li Y. Q. Speed optimization control method of smooth motion for high-speed CNC machine tools // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49 (1). P. 313–325.
17. Sun S., Lin H., Liaomo Z., Jingang Y., Yi H. A real-time and look-ahead interpolation methodology with dynamic B-spline transition scheme for cnc machining of short linesegments // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84 (5). P. 1359–1370.
18. Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. и др. Биоинспирированные методы в оптимизации: монография. М.: Физматлит, 2009. 384 с.
19. Ganesan H., Mohankumar G. Optimization of machining techniques in CNC turning centreusing genetic algorithm // Arabian Journal for Science and Engineering. 2013. 38 (6). P. 1529–1538.
20. Guohua M. Genetic Algorithms for Manufacturing Process Planning. Berlin: Heidelberg, Springer, 2012. P. 205–244.
21. Wang G., Wang Y., Zhao J., Chen G. Process optimization of the serial-parallelhybrid polishing machine tool based on artificial neural network and genetic algorithm // Journal of Intelligent Manufacturing. 2012. 23 (3). P. 365–374.
22. Tarokh M., Zhang X. Real-time motion tracking of robot manipulators using adaptive genetic algorithms // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2014. 74 (3). P. 697–708.
23. Bernhard K., Jens V. The Traveling Salesman Problem. Berlin: Heidelberg, Springer, 2012. 592 p.
24. Sun G., Li C., Zhu J., Li Y., Liu W. An Efficient Genetic Algorithm for the Traveling Salesman Problem. Berlin: Heidelberg, Springer, 2010. P. 108–116.
25. Baesler F. and Palma P. Multiobjective parallel machine scheduling in the sawmill industry using genetic algorithms // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014, 74 (5). P. 757–768.
26. Dewil R., Vansteenvagen P., Cattrysse D. A review of cutting path algorithmsfor laser cutters // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. P. 1–20.
27. Lo T.-M., Young J.-S. Improvements of productivity for PCB drilling by laserdriller machine // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2014. 15 (8). P. 1575. C. 1581.
28. Pappa G. L., Freitas A. A. Evolutionary Algorithms. Berlin: Heidelberg, Springer, 2010. P. 47–84.
29. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003. 432 с.

S. V. Akimov¹, PhD, Associate Professor, akimov-sv@yandex.ru, **M. Ya. Afanasyev²**, PhD, Associate Professor, amax@niuitmo.ru, **N. P. Metkin³**, Doctor of Science, Professor, CEO, metkin010843@yandex.ru,
Yu. V. Fedosov², PhD, Associate Professor, yf01@yandex.ru

¹ The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint-Petersburg, 193382, Russian Federation

² ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

³ Cluster "Development of information technology, electronics, instrumentation, communications, and information and telecommunications St. Petersburg", Saint Petersburg, Russian Federation

Corresponding author:

Akimov Sergey V., Associate Professor, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint-Petersburg, 193382, Russian Federation, akimov-sv@yandex.ru

Optimization of the Laser Processing Trajectory for the Planar MEMS Dies

Received on July 03, 2017

Accepted on August 07, 2017

The purpose of this study is developing a new approach to the optimization of the CNC laser tool trajectory during laser processing of irregular shapes along the specified processing trajectory. As a part of this study the trajectory optimization task was solved by means of decreasing the amount of tool free runs as well as a new approach to control the acceleration and deceleration of the actuating mechanism. As the result of the study, two main methods of time reduction are provided — by increasing processing speed using smooth aliasing of acceleration/deceleration curves and reducing the number of auxiliary moves using a genetic algorithm. During the study, various trajectory optimization methods were examined, and the best results have been achieved by direct optimization of actuating mechanism moves and trajectory optimization before sending it to the CNC. The second optimization method was modeled using specific software. The proposed approach allows it to decrease the processing time by 25–30 %.

Keywords: laser processing, CNC, trajectory optimization, genetic algorithms, traveling salesman problem, hi-speed processing, smooth aliasing of acceleration/deceleration curves

For citation:

Akimov S. V., Afanasyev M. Ya., Metkin N. P., Fedosov Yu. V. Optimization of the Laser Processing Trajectory for the Planar MEMS Dies, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 145–157.

DOI: 10.17587/nmst.20.145-157

Introduction

Manufacturing cannot do without new technologies and high-precision equipment with a computer numerical control (CNC). Since the late 1970s, such equipment has been improved and now we have at our disposal 3D-printers, 3D-scanners, automated assembly lines, laser engravers, markers, and also hybrid and adaptive technological systems [1].

Development and research of the algorithms for operation of CNC machine tools is a challenge including the problem of reducing the time for processing corresponding to the software and hardware potentials of the equipment and the mechanical characteristics of their engines [2, 3]. As it follows from [4, 5], the trajectory optimization may be one of the main tasks, a solution to which can influence the productivity and the quality of the manufactured products.

It is important to note that any CNC technological equipment has a mechanism, which moves the terminal unit along a certain trajectory. Certainly, its efficiency (especially the duration of processing) depends on the speed of movement of the mechanism and its trajectory. Obviously, the possibilities of the equipment components determine the main criterion of the system's productivity — reduction of the time for processing. This makes the basis for the formation of a movement trajectory during the beam processing.

In general, construction of a trajectory boils down to construction of a diagram of dependence of a trajectory for a period of time, during which the terminal unit moves along it. Usually the trajectory is expressed as a parametrical function on the time, the value of which corresponds to a certain position of the terminal unit in each moment of time [6]. Having defined this function, it is necessary to consider the features of its use. In most cases of machine-tool processing, the tool trajectory is set by a CAM program automatically. There are two major factors influencing the quality of the processing: control of the geometry of the trajectory and control of the kinematic parameters of the machine tool. These factors also influence the productivity of the equipment [7]. While most of the existing algorithms for the supply calculation are based on the speed and acceleration as the major reliability factors, the use of the dynamic states of the higher order, such as jerk, makes the calculation and supply optimization a very challenging task [8].

The main problem is an increase of supply with a simultaneous preservation of the accuracy of processing and observance of the restrictions on the accelerations imposed by the machine tool [4]. The trajectory construction should take into account the speeds, accelerations and jerks in the course of its detour.

In general, the task boils down to a search for close to optimal trajectories, which correspond to certain cri-

teria. For example, the smallest period of the time of passage [3]. There are two basic methods for construction of a trajectory — with the use of the network technologies, or without them. Construction of a trajectory with the use of the network technologies envisages an adaptive development of the trajectory of movement during implementation of the program. In contrast, without the network technologies, a preliminary processing of the program for CNC with a view of a search for inseparable ways and reduction of the auxiliary steps is needed. Such an approach can be used for the processing of the workpieces via complex trajectories consisting of a large number of separate lines.

For example, during 3D printing of large parts with various supporting structures inside, or during the cutting of a large number of unequal parts from a sheet, or the manufacturing of the parts with a large number of apertures on a plane.

Experimental installation for processing of MEMS substrates by irradiation

MEMS requires the manufacturing of parts on a substrate of complex forms, in particular, those containing a lot of diverse elements, complex forms, etc. In batch production, this demands several technological operations in various modes of processing. However, at the stage of manufacturing of a MEMS model, the involvement of the entire technological chain is economically inexpedient. Thus, it is necessary to design an installation allowing us to integrate several operations concerning the light-striking of the photoresist without the use of the photo mask, annealing, micro-welding, and cutting in order to create an analogue of a model-bench laboratory for the micro-devices within the framework of one CNC system [9–10].

In the presented work, a device (fig. 1) is discussed for the laser processing of the plane workpieces by laser radiation. It consists of a fixed table on which an object is placed, a laser head moving in two co-ordinates over the table, and a source of the laser radiation optically interfaced with the laser head [11–13]. On the example of the given device, various methods for optimization of the trajectory of the laser head movement in the course of processing are considered.

An experiment was done with the application of the substrate covered by a photoresist. It was experimentally proven that during the use of a source of a small power (solid-state laser with the wavelength of 405 nm and power of 500 mW), the speed of movement of the laser head only insignificantly influenced the quality of the polymer processing.

Fig. 2 presents one of the samples. It is made from CTF-2 foil-clad glass-cloth laminate covered by POSITIV20 photoresist. During the experiment and after processing, the sample was placed in 1 % solution of

sodium hydroxide and then pickled in a concentrated solution of iron acid in order to remove copper from the lighted sites. It is necessary to point out, that within the range of speeds of 500...950 mm/min. the lines left by the laser beam have a practically identical thickness. This testifies to the fact that a further increase of the speed of processing simultaneously with preservation of the density of radiation sufficient for processing of a photoresist, is possible. In other words, a selective hardening of the polymers can be considered as a high-efficiency processing of materials, and accordingly, the processing trajectory should be optimized for work at the maximum speed.

Main ways for optimization of a trajectory

The main task of optimization is achievement of the maximum speed of detour of a trajectory. Each CNC program represents a sequence of the commands, most of which describe the tool's movement. Hence, a tool's trajectory is a sequence of segments. In CNC machine tools, the linear and circular interpolations are realized so that the segments represent lines and arches. For each command or a frame, a supply is set, but ISO 6983-1:2009 standard [14] does not stipulate that on each of the segments described in a frame the machine tool should accelerate up to the maximum speed.

During the experiments it was proved, that the mechanical characteristics of the engines do not allow the system to reach the maximum speed of supply at the trajectory of detour. Besides, not a single engine can begin its work with the maximum frequency of rotation and simultaneously ensure the maximum twisting moment. For each engine employed in the CNC machine tools, there is a dependence on the frequency of rotation on time, in other words, an acceleration-deceleration curve. In general, this curve is presented in the form of a trapeze: in the beginning the engine is accelerated up to the moment of the necessary speed, and then the movement goes on at a constant value of speed, and in the end it linearly slows down. The problem is that the value of supply is not connected with the length of the frame.

Thus, on the short segments of a trajectory, when a slowdown of the movement begins right after the acceleration, the trapezoid diagram degenerates into a triangular one, and the machine tool cannot reach the maximum speed of processing. It is obvious, that at a detour of the trajectory consisting of a set of short frames, from frame to frame the actuating mechanism will jerk. This causes vibrations and accelerates wear of the engines and other moving parts [15].

The following approach is proposed for the optimization of a trajectory during processing of a workpiece on a machine tool with CNC:

1. Realization of the algorithm for a two-passage analysis of the control program. At the first passage, the general characteristics of the trajectory will be estimated such as the length of the segments and the minute supply at each of them. After which, all the trajectory will be broken into equal blocks. At the second stage, a buffer will be created in which the blocks will be located in order to calculate the parameters of the curves of the acceleration-deceleration accounting for their interface. The size of the buffer can vary and depends on the maximum speed set in the control program. Thus, such a number of blocks will be placed in the buffer enabling it to stop the engine in a regular mode (without excess of the maximum acceleration and jerk for the installation). Such an approach will allow the actuating mechanism to be accelerated smoothly during several blocks to achieve the set contour speed.

2. Transition from the trapezoidal acceleration-deceleration curve to a double S-shaped one (fig. 3). By the results of the conducted tests, we came to a conclusion that such a trajectory allows us to optimize not only the second derivative of the co-ordinate by time (acceleration), but also the third one — the jerk. Presence of a controllable jerk allows us to more flexibly control the parameters of acceleration and deceleration on short frames and also to lower the load on the mechanical parts of the equipment [16, 17].

Besides the optimization of the trajectory in real time mode, the other primary goal is optimization of the trajectory before starting the program on a machine tool. Three approaches can be considered for reduction of the time for processing:

— a search for the longest continuous site of a trajectory without sharp angles, on which the terminal unit (the table carriage) will have time to accelerate up to the greatest possible speed taking into account the restrictions of the maximum acceleration and jerk;

— the minimization of the auxiliary steps when the carriage moves with a source of radiation that is switched off;

— a combination of the first two approaches allowing us to find the longest possible trajectory without sharp angles including both the working and auxiliary steps with account of the small on/off time of the laser radiation.

The following solution is offered. First, a coordinate grid with a set step of splitting is put on the area limited by the processing. The trajectory set by the coordinates of nodes and a set of edges is broken into segments that are numbered and put on the list. Each segment in the list contains information on the direction of the detour of the trajectory, and their order in the list defines the order of their detour. The total time of the detour of the trajectory consists of time spent for the detour of all the segments when the laser is turned on, and also the time spent for the auxiliary steps when the laser is turned off

and the movement is carried out at the maximum speed (fig. 4).

Each segment can be presented:

$$S(i) \stackrel{\text{def}}{=} \langle x_a, y_a, x_b, y_b, l, d, i, j, v, t \rangle, \quad (1)$$

where x_a, y_a, x_b, y_b — coordinates of the beginning and the end of the segment (points a and b), accordingly, l — length of the segment, v — speed of passage of the segment; t — time spent for a passage of the segment, d — direction of the passage of the segment; i — identifier of the segment, j — segment number in the turn for processing. The numbers of the segments define the sequence of their processing. The list of the segments defines completely the processing trajectory:

$$\text{List} \stackrel{\text{def}}{=} \langle S_{(i, j)} \rangle, \quad i, j \in \overline{1, n}, \quad (2)$$

where i — identifier of the segment, j — segment number on the list setting a turn for processing, n — number of segments. Then, the time spent for processing will be:

$$T = T_p + T_{idle}, \quad (3)$$

where T_p — time spent for processing (working steps); T_{idle} — time necessary for movement from the base point to the first segment, and from the last segment to the base point — the time spent for the auxiliary steps of the carriage.

Furthermore, the task of optimization can be presented as a search for the sequence of the segments of processing and their orientation (the beginning and the end of the site where the laser is turned on/off) and when the operating time with the switched off laser will be minimal. Since the time spent for processing of the segments does not depend on the sequence of their processing, the task is reduced only to minimization of time T_{idle} .

Taking into consideration that the engines moving the laser head in two co-ordinates can move independently of each other, the time of the idle movement between two active sites is proportional to the maximum increment for each axis:

$$T_{x(i)} = k \max(|x_a - x_b|, |y_a - y_b|). \quad (4)$$

The total time spent for auxiliary steps is equal:

$$T_x = \sum_i T_{x(i)}, \quad i \in \overline{1, n}. \quad (5)$$

This task can be solved with the use of genetic algorithms [18]. The genetic algorithms are widely used for development and optimization of CNC programs. In particular in [19], their use is described for elaboration of a technique for sorting without domination (NSGA-II) and construction of the front of the frequency distribution for creation of a multi-criteria

method for optimization of the processing parameters (cut depth, supply and speed) for work on a lathe.

In [20] is devoted to the problems of application of the genetic algorithms in the automated technological preparation of manufacturing (ATPM). In other words, it is for a systematic formalization of the methods for processing (concerning the technological operations, processing, tools, etc.) with a view of improvement of the economic and industrial parameters of the manufacturing of products. In [21], research was done on the problems of application of the genetic algorithms together with a neuronet for research of the optimal parameters for processing during the operation of a hybrid multi-position polishing machine tool. In [22], the way is presented for the tracing of movement of the superfluous and redundant manipulators based on a genetic algorithm in real time mode.

This article offers a solution. A chromosome will consist of the genes describing the sequence of the passage of the segments and their orientation, defining the direction of processing (fig. 5). In order to define a direction and a trajectory of the movement of a laser beam along a segment, each gene contains information on the number of a segment and the direction of processing. In case the beam moves from a to b, the direction is coded as zero, and if the direction is reversed, then as one. The sequence of the genes in a chromosome defines the sequence of the beam processing of each of the segments, thus, a chromosome codes in a definite way the trajectory of the laser processing of a product.

Additionally, a crossover should be used for all the genes in a chromosome. If this condition is not observed, a certain part of the segments subject to processing will not be processed, while some of them will be processed twice. This type of a crossover was studied and applied for solving the traveling salesman problem with the use of genetic algorithms. The elementary form of the operator of a crossover is presented in fig. 5. An operator of a mutation can work with a direction of processing of a segment and with a change of places of separate segments (fig. 6). Such a crossover will be close to the one used for solving the traveling salesman problem [23, 24], except for the addition of a direction of the passage of a segment.

Since the genetic algorithms proved their efficiency for solving the traveling salesman problem, this allows us to assume the efficiency of application of the strategy for solving the problem of optimization of a movement trajectory during processing by radiation [25–27]. In order to increase the efficiency of the algorithm, it is possible to apply the heuristics consisting of changing the orientation of the neighboring segment in such a way that the distance between the segment's ends and the way of an auxiliary course will be minimal.

Application of the heuristic method is also possible for a consecutive improvement of the prototype [28] integrated with the method of a global adaptive casual search suggested in [29], which is used in the following way. At first, a set of solutions is generated in a random way, from which the final set (n) of the best solutions is selected. Furthermore, these solutions are modified by application of shifts. From the received solutions, again n of the best ones is selected. Subsequently, from iteration to iteration, the range (Hamming distance) is reduced. After a set number of iterations for each of the solutions, the process of perfection of the prototype is started. The results of modeling of the approach are presented in fig. 7.

Conclusion

Approaches to the construction of the optimal trajectory for the actuating mechanism of a machine tool were considered. Time was used as the main criterion for the optimization of the processing. Two basic approaches were offered: an increase of the speed of processing due to a smooth aliasing of the acceleration-deceleration curves and a reduction of the number of the auxiliary steps. Experiments demonstrated that it was possible to reduce the time for the processing when the CNC controller carried out acceleration and deceleration along the sites following one after another, which had been preliminary selected and kept in the buffer.

For a reduction of the number of the auxiliary steps, a genetic algorithm was developed with the modified heuristics and based on the algorithm for solving the travelling salesman problem. The methods proposed for optimization of the trajectory of the actuating mechanism during processing by radiation can reduce the ways of the processing and raise the efficiency of the technological equipment. An experimental installation and a universal program library incorporating the described algorithms was established allowing us to calculate the optimization parameters.

On the test example, the efficiency of the installation working via the trajectory, received by means of the proposed method, was 81.8 % of the optimal version. For comparison, for the same test data, the efficiency of the trajectory, received by means of a program without the optimization was only 9.95 %. It is possible to expect that in the conditions of industrial production the approach will ensure an increase of the efficiency from 25 to 30 %.

References

1. Afanas'ev M. Ya., Gribovskij A. A. Koncepcija adaptivnoj platformy tehnologicheskogo oborudovanija. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2015, vol. 58, no. 4, pp. 268–272. DOI 10.17586/0021-3454-2015-58-4-268-272 [in Russian].
2. Qiang Z., Li S.-R. Ecient computation of smooth minimum time trajectory for CNC machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68 (1), pp. 683–692.
3. Torsten K. Literature Survey: *Trajectory Generation in and Control of Robotic Systems*. Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Springer, 2010, pp. 11, 31 p.
4. Li X. Z., Rui Y. S., Xiao S., G., Li H. B. High speed interpolation for microline trajectory and adaptive real-time look-ahead scheme in CNC machining, *Science China Technological Sciences*, 2011, 54 (6), pp. 1481–1495.
5. Chunming Y., Ke Z., Wei F. Time-optimal interpolation for CNC machining along curved tool pathes with conned chord error, *Journal of Systems Science and Complexity*, 2013, 26 (5), pp. 836–870.
6. Biagiotti L., Melchiorri C. *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*. Berlin Heidelberg, Springer, 2008.
7. Beudaert X., Lavernhe S., Tournier C. Direct trajectory interpolation onthe surface using an open CNC, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 75 (1), pp. 535–546.
8. Bharathi A., Dong J. Feedrate optimization for smooth minimum-time trajectorygeneration with higher order constraints, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82 (5), pp. 1029–1040.
9. Ratkin L. S. Sovremennye tehnologii proektirovaniya, konstruirovaniya i proizvodstva nano i mikroelektromehanicheskikh sistem, *Nano- i mikrosistemnaja tekhnika*, 2013, no. 3, pp. 2–5 [in Russian].
10. Vasil'ev V. Ju. Trendy razvitiya tehnologij i proizvodstva komponentov i uzlov mikrosistemnoj tekhniki, *Nano- i mikrosistemnaja tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 7, pp. 403–415 [in Russian].
11. Afanasyev M. Y., Fedosov Y. V., Nemkova A. A. Designing features of power optical units for technological equipment *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 16, no. 2 (102), pp. 244–250. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-244-250 [in Russian].
12. Afanasyev M. Ja., Fedosov Ju. V. Patent RF № 161667. *Ustroystvo dlja obrabotki lazernym izlucheniem poverhnosti proizvol'noj formy*, Opubl. 27.04.2016. Bjul. no. 12.
13. Afanasyev M. Ja., Fedosov Ju. V. Patent RF № 2583163. *Optiko-mekhanicheskaja Sistema*. Opubl. 10.05.2016. Bjul. no. 13 [in Russian]
14. ISO 6983-1:2009 (en): *Automation systems and integration. Numerical control of machines. Program format and definitions of address words. Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems*.
15. Lin W., Cao J. A look-ahead and adaptive speed control algorithm for high-speed CNC equipment, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 63 (5), pp. 705–717.
16. Wang L., Cao J. F., Li Y. Q. Speed optimization control method of smoothmotion for high-speed CNC machine tools, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 49 (1), pp. 313–325.
17. Sun S., Lin H., Liaomo Z., Jingang Y., Yi H. A real-time and look-ahead interpolation methodology with dynamic B-spline transition scheme for cnc machining of short linesegments, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 84 (5), pp. 1359–1370.
18. Gladkov L. A., Kurejchik V. V., Kurejchik V. M. *Bioinspirirovannye metody v optimizacii: monografija*. Moscow, Fizmatlit, 2009. 384 p. [in Russian].
19. Ganesan H., Mohankumar G. Optimization of machining techniques in CNC turning centreusing genetic algorithm, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2013, 38 (6), pp. 1529–1538.
20. Guohua M. *Genetic Algorithms for Manufacturing Process Planning*. Berlin Heidelberg, Springer, 2012, pp. 205–244.

21. Wang G., Wang Y., Zhao J., Chen G. Process optimization of the serial-parallelhybrid polishing machine tool based on artificial neural network and genetic algorithm, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2012, 23 (3), pp. 365–374.
22. Tarokh M., Zhang X. Real-time motion tracking of robot manipulators using adaptive genetic algorithms, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2014, 74 (3), pp. 697–708.
23. Bernhard K., Jens V. *The Traveling Salesman Problem*. Berlin Heidelberg, Springer, 2012, pp. 557, 592.
24. Sun G., Li C., Zhu J., Li Y., Liu W. *An Efficient Genetic Algorithm for the Traveling Salesman Problem*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 108–116.
25. Baesler F., Palma P. Multiobjective parallel machine scheduling in the sawmill industry using genetic algorithms, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 74 (5), pp. 757–768.
26. Dewil R., Vansteenkiste P., Catrysse D. A review of cutting path algorithms for laser cutters, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, pp. 1–20.
27. Lo T.-M. Young J.-S. Improvements of productivity for PCB drilling by laserdriller machine, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15 (8), pp. 1575, 1581.
28. Pappa G. L., Freitas A. A. *Evolutionary Algorithms*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 47–84.
29. Emel'janov V. V., Kurejchik V. V., Kurejchik V. M. *Teoriya i praktika jevoljucionnogo modelirovaniya*, Moscow, Fizmatlit, 2003, 432 p. [in Russian].

УДК 537.228.1 + 539.219.1

DOI: 10.17587/nmst.20.157-166

В. Ю. Тополов, д-р физ.-мат. наук, проф., e-mail: vutopolov@sedu.ru, **А. Н. Исаева**, студент, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

ПЬЕЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ФАКТОРЫ АНИЗОТРОПИИ БЕССВИНЦОВОГО 1—0—3-КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА $(K, Na)(Nb, Ta)O_3$

Поступила в редакцию 02.11.2017

При исследовании нового 1—0—3-композита "кристалл $(K, Na)(Nb, Ta)O_3$ — кристалл $Li_2B_4O_7$ — полиэтилен" показана важная роль матрицы "кристалл $Li_2B_4O_7$ — полиэтилен" в формировании высокой пьезочувствительности композита ($g_{33}^* \approx (0,1\dots 1) \text{ В}\cdot\text{м}/\text{Н}$, $h_{33}^* \approx 10^{10} \text{ В}/\text{м}$), большой анизотропии пьезомодулей ($|d_{33}^*/|d_{31}^*| = g_{33}^*/|g_{31}^*| \gg 1$) и коэффициентов электромеханической связи ($|k_{33}^*/|k_{31}^*| \gg 1$, $k_t^*/|k_p^*| \gg 1$ при $k_{33}^* \approx k_t^* \approx 0,7\dots 0,8$). Установлено одновременное выполнение трех условий большой анизотропии в определенных концентрационных интервалах. Композит представляет интерес как активный элемент пьезопреобразователей, сенсоров и гидроакустических устройств.

Ключевые слова: бессвинцовий композит, сегнетоэлектрический кристалл, пьезоэлектрический кристалл, полимер, пьезокоэффициенты, коэффициенты электромеханической связи, пьезочувствительность, факторы анизотропии

Введение

В последнее десятилетие большое внимание уделяется поиску и исследованиям бессвинцовых сегнетоэлектрических (СЭ) и пьезоэлектрических материалов [1—4], свойства и отдельные параметры которых могут быть лучше, чем у свинецсодержащих материалов [5], таких как керамики на основе $Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$, кристаллы $(1-x)Pb(A_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - xPbTiO_3$ ($A = Mg; Zn$) и др. Несмотря на большое число публикаций по бессвинцовым СЭ и пьезоэлектрикам (см., например, данные в обзоре [4]), в литературе подробно не были рассмотрены свойства пьезокомпозитов на основе бессвинцовых СЭ кристаллов, а также не проводился целенаправленный отбор потенциальных компонентов. Цель настоящей работы — проанализировать пьезоэлектрические свойства композитов, их анизотропию и родственные параметры нового бессвинцового композита с двумя кристаллическими компонен-

тами, а также показать преимущества этого композита по сравнению с известными СЭ материалами.

Структура композита и его эффективные параметры

В исследуемом композите протяженные СЭ кристаллические стержни окружены матрицей "пьезоэлектрический кристалл — полимер" (рис. 1). Центры симметрии квадратных оснований стержней находятся в вершинах квадратов, лежащих в плоскости (X_1OX_2) . Кристаллографические оси $X^{(1)}$, $Y^{(1)}$, $Z^{(1)}$ каждого стержня ориентированы так, что $X^{(1)} \parallel OX_1$, $Y^{(1)} \parallel OX_2$, $Z^{(1)} \parallel OX_3$, а спонтанная поляризация каждого стержня $P_s^{(1)} \uparrow\uparrow OX_3$. Матрица композита представляет собой систему сфероидальных кристаллических включений внутри полимера (см. вставку на рис. 1) и характеризуется связностью 0—3 по терминологии работы [6]. При

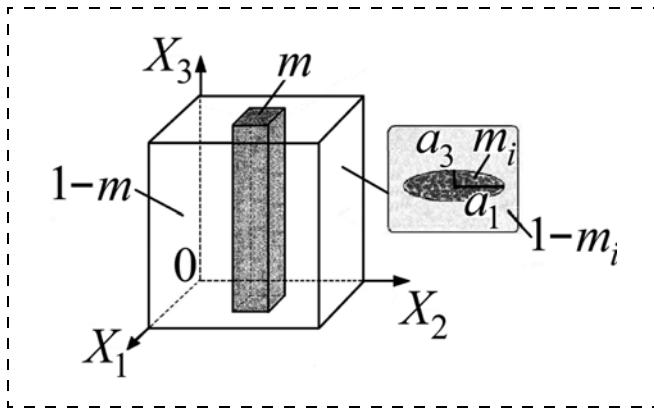


Рис. 1. Схематическое изображение 1—0—3-композита с двумя кристаллическими компонентами. ($X_1X_2X_3$) — прямоугольная система координат, m и $1 - m$ — объемные концентрации кристаллических стержней и окружающей матрицы соответственно. На вставке справа показан фрагмент 0—3-матрицы "кристалл — полимер", где m_i — объемная концентрация кристаллических сфероидальных включений и $1 - m_i$ — объемная концентрация полимера в 0—3-матрице, a_1 и a_3 — длины полуосей сфероидального включения

Fig. 1. Schematic of the 1—0—3 composite with two single-crystal components. ($X_1X_2X_3$) is the rectangular coordinate system, m and $1 - m$ are volume fractions of the crystal rods and surrounding matrix, respectively. The insert presents a fragment of the 0—3 "single crystal — polymer" matrix, where m_i is the volume fraction of the single-crystal spheroidal inclusions, $1 - m_i$ is the volume fraction of polymer in the 0—3 matrix, and a_1 and a_3 are lengths of the semiaxes of the spheroidal inclusion

ЭТОМ a_1 , $a_2 = a_1$, a_3 — длины полуосей включения; $\rho_i = a_1/a_3$ — аспектное отношение, а длина наибольшей полуоси a_k значительно меньше длины стороны квадрата в основании стержня. Ориентация кристаллографических осей $X^{(2)}$, $Y^{(2)}$, $Z^{(2)}$ включения задается условиями $X^{(2)} \parallel OX_1$, $Y^{(2)} \parallel OX_2$, $Z^{(2)} \parallel OX_3$, а центры симметрии включений находятся в вершинах прямоугольных параллелепипедов. Присутствие одного СЭ компонента (т.е. стержней с $P_s^{(1)} \uparrow\uparrow OX_3$) облегчает поляризацию композита вдоль оси OX_3 , а присутствие пьезоэлектрического компонента в матрице улучшает электромеханическую связь в системе "стержни — матрица" и влияет

на параметры композита. Исследуемый композит (см. рис. 1) описывается связностью 1—0—3.

Электромеханические свойства 0—3-матрицы $\Pi^{(0-3)}(m_i, \rho_i)$ определяются в рамках метода эффективного поля [6] и учитываются при расчете эффективных свойств композита $\Pi^*(m, m_i, \rho_i)$ с помощью матричного метода [6]. Далее в работе мы используем звездочку (*) для обозначения эффективных свойств и параметров 1—0—3-композита. В обоих упомянутых выше методах учитывается электромеханическое взаимодействие между компонентами. Эффективные свойства композита представляются полным набором упругих податливостей s_{ab}^E при электрическом поле $E = \text{const}$, пьезомодулей d_{fl}^* и диэлектрических проницаемостей $\epsilon_{rr}^{*\sigma}$ при механическом напряжении $\sigma = \text{const}$. С помощью формул, приведенных в работах [6, 7], можно найти пьезокоэффициенты g_{kl}^* , e_{kl}^* и h_{kl}^* , коэффициенты электромеханической связи (КЭС) $k_{3l}^* = d_{3l}^*/(\epsilon_{33}^{*\sigma} s_{ll}^E)^{1/2}$ (продольная и поперечная моды колебаний при $l = 3$ и $l = 1$ соответственно), $k_t^* = e_{33}^*/(c_{33}^{*D} \epsilon_{33}^{*\xi})^{1/2}$ (толщинная мода колебаний), $k_p^* = k_{31}^* [2s_{11}^E/(s_{11}^E + s_{12}^E)]^{1/2}$ (планарная мода колебаний), а также факторы анизотропии композита

$$\zeta_1^* = d_{33}^* / d_{31}^* ; \quad \zeta_2^* = k_{33}^* / k_{31}^* = \zeta_1^* (s_{11}^E / s_{33}^E)^{1/2} ; \\ \zeta_3^* = k_t^* / k_p^* , \quad (1)$$

где c_{33}^{*D} — модуль упругости при электрическом смещении $D = \text{const}$; $\epsilon_{33}^{*\xi}$ — диэлектрическая проницаемость при деформации $\xi = \text{const}$.

В качестве бессвинцовых компонентов, представляющих интерес, мы рассматриваем СЭ кристалл ($K_{0,562}Na_{0,438}(Nb_{0,768}Ta_{0,232})O_3$ (KNN-T) [2], поляризованный вдоль направления [001] перовскитовой ячейки (см. константы в табл. 1), пьезо-

Таблица 1
Table 1

Экспериментальные значения упругих податливостей s_{ab}^E (в 10^{-12} Па^{-1}), пьезомодулей d_{ij} (в пКл/Н) и диэлектрических проницаемостей ϵ_{pp}^σ поляризованного вдоль [001] кристалла KNN-T (симметрия 4mm) [2] при комнатной температуре
Experimental values of the elastic compliances s_{ab}^E (in 10^{-12} Pa^{-1}), piezomoduli d_{ij} (in pC/N) and dielectric permittivities ϵ_{pp}^σ of the KNN-T crystal poled along [001] (4mm symmetry) [2] at the room temperature

s_{11}^E	s_{12}^E	s_{13}^E	s_{33}^E	s_{44}^E	s_{66}^E	d_{31}	d_{33}	d_{15}	$\epsilon_{11}^\sigma / \epsilon_0$	$\epsilon_{33}^\sigma / \epsilon_0$
11,9	-4,30	-5,60	15,5	12,0	10,7	-77,0	162	45,0	291	267

электрический кристалл $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (LBO) [8] и полиэтилен [6, 9] (см. константы в табл. 2). Кристалл LBO демонстрирует уникальную упругую анизотропию при низкой пьезоактивности, и его модули упругости $c_{ab}^{(2), E}$ связаны отношениями $c_{11}^{(2), E}/c_{12}^{(2), E} = 37,8$, $c_{11}^{(2), E}/c_{13}^{(2), E} = 4,04$ и $c_{11}^{(2), E}/c_{33}^{(2), E} = 2,38$ (см. данные в табл. 2). Ниже мы рассматриваем особенности пьезоэлектрического отклика, КЭС и факторы анизотропии (1) 1–0–3-композита "кристалл KNN-T — кристалл LBO — полиэтилен". В этом композите пьезоэлектрические стержни из кристалла KNN-T окружены 0–3-матрицей, пьезоэлектрические свойства которой обусловлены односторонними включениями из кристалла LBO.

Пьезочувствительность и факторы анизотропии композита

В настоящем исследовании анализируются эффективные свойства $\Pi^*(m, m_i, \rho_i)$ и родственные параметры композита в интервалах $0 < m < 1$, $0,05 \leq m_i \leq 0,30$ и $0,01 \leq \rho_i \leq 100$. При относительно небольших объемных концентрациях m и m_i кристаллических компонентов (см. рис. 1) для композита выполняются условия большой анизотропии

$$|\zeta_j^*| \gg 1, \quad (2)$$

где $j = 1; 2; 3$ (рис. 2, a—c). Одновременное выполнение трех условий (2) обеспечивает однодомовый режим, связанный с продольной ($j = 1; 2$) или толщиной ($j = 3$) модой колебаний пьезоэлемента [7]. Добавим, что вследствие тетрагональной симметрии 4mm кристаллических компонентов [2, 8] фактор анизотропии ζ_1^* из (1) можно представить как $\zeta_1^* = g_{33}^*/g_{31}^*$. Большие значения $g_{33}^* \approx (0,1...1) \text{ В} \cdot \text{м}/\text{Н}$ (кривая 1 на рис. 2, a, b) до-

стигаются при относительно низкой диэлектрической проницаемости $\epsilon_{33}^{*\sigma}$, на значение которой существенно влияют $\epsilon_{33}^{(0-3), \sigma}$ матрицы и $\epsilon_{33}^{(2), \sigma}$ кристалла LBO в ее составе. Большие значения g_{33}^* при $|\zeta_1^*| \gg 1$ следует учитывать при определении гидростатических пьезокоэффициентов и параметров приема, которые играют важную роль в гидрофонах и гидроакустических системах [6]. Значения КЭС $k_{33}^* \approx 0,8$ (кривая 2 на рис. 2, a, b) и $k_t^* \approx 0,7...0,8$ (рис. 2, d) достигаются при умеренном для СЭ материалов [5] значении пьезомодуля $d_{33}^{(1)}$ кристалла KNN-T [2]. В области локального $\max k_t^*$ (рис. 2, d) справедливо условие $k_t^* \approx k_{33}^*$, что свойственно композитам типа 1–3 [6].

Из рис. 2, a, b, следует, что условия (2) одновременно выполняются в основном при $\rho_i \gg 1$, т.е. в случае сильно сплющенных включений кристалла LBO. Система таких включений в полиэтилене эффективно влияет на анизотропию упругих свойств 0–3-матрицы (рис. 3) даже при относительно малых объемных концентрациях кристалла LBO m_i . При этом диэлектрическая проницаемость 0–3-матрицы $\epsilon_{33}^{(0-3), \sigma}$ подчиняется условию $\epsilon_{33}^{(0-3), \sigma} \ll \epsilon_{33}^{(2), \sigma}$. Условия (2) при $\rho_i = 100$ (рис. 2, c) выполняются, например, для композита, продольный пьезоэффект в котором характеризуется следующими параметрами: $d_{33}^* = 146 \text{ пКл}/\text{Н}$, $g_{33}^* = 0,611 \text{ В} \cdot \text{м}/\text{Н}$, $k_{33}^* \approx k_t^* \approx 0,80$ (при $m = 0,10$ и $m_i = 0,05$) или $d_{33}^* = 153 \text{ пКл}/\text{Н}$, $g_{33}^* = 0,326 \text{ В} \cdot \text{м}/\text{Н}$, $k_{33}^* \approx k_t^* \approx 0,82$ (при $m = 0,20$ и $m_i = 0,05$). Уменьшение g_{33}^* обусловлено увеличением $\epsilon_{33}^{*\sigma}$ при увеличении m , и эта тенденция прослеживается в широком интервале ρ_i .

Таблица 2
Table 2

Экспериментальные значения модулей упругости c_{ab}^E (в 10^{10} Па), пьезокоэффициентов e_{ij} (в $\text{Кл}/\text{м}^2$) и диэлектрических проницаемостей ϵ_{pp}^ξ матричных компонентов при комнатной температуре
Experimental values of the elastic moduli c_{ab}^E (in 10^{10} Pa), piezoelectric coefficients e_{ij} (in C/m^2) and dielectric permittivities ϵ_{pp}^ξ of the matrix components at the room temperature

Компонент Component	c_{11}^E	c_{12}^E	c_{13}^E	c_{33}^E	c_{44}^E	c_{66}^E	e_{31}	e_{33}	e_{15}	$\epsilon_{11}^\xi/\epsilon_0$	$\epsilon_{33}^\xi/\epsilon_0$
Кристалл LBO (симметрия 4mm) [8] <i>LBO single crystal (4mm symmetry) [8]</i>	13,5	0,357	3,35	5,68	5,85	4,67	0,290	0,928	0,472	8,90	8,07
Полиэтилен [6, 9] <i>Polyethylene [6, 9]</i>	0,0778	0,0195	0,0195	0,0778	0,0292	0,0292	0	0	0	2,3	2,3

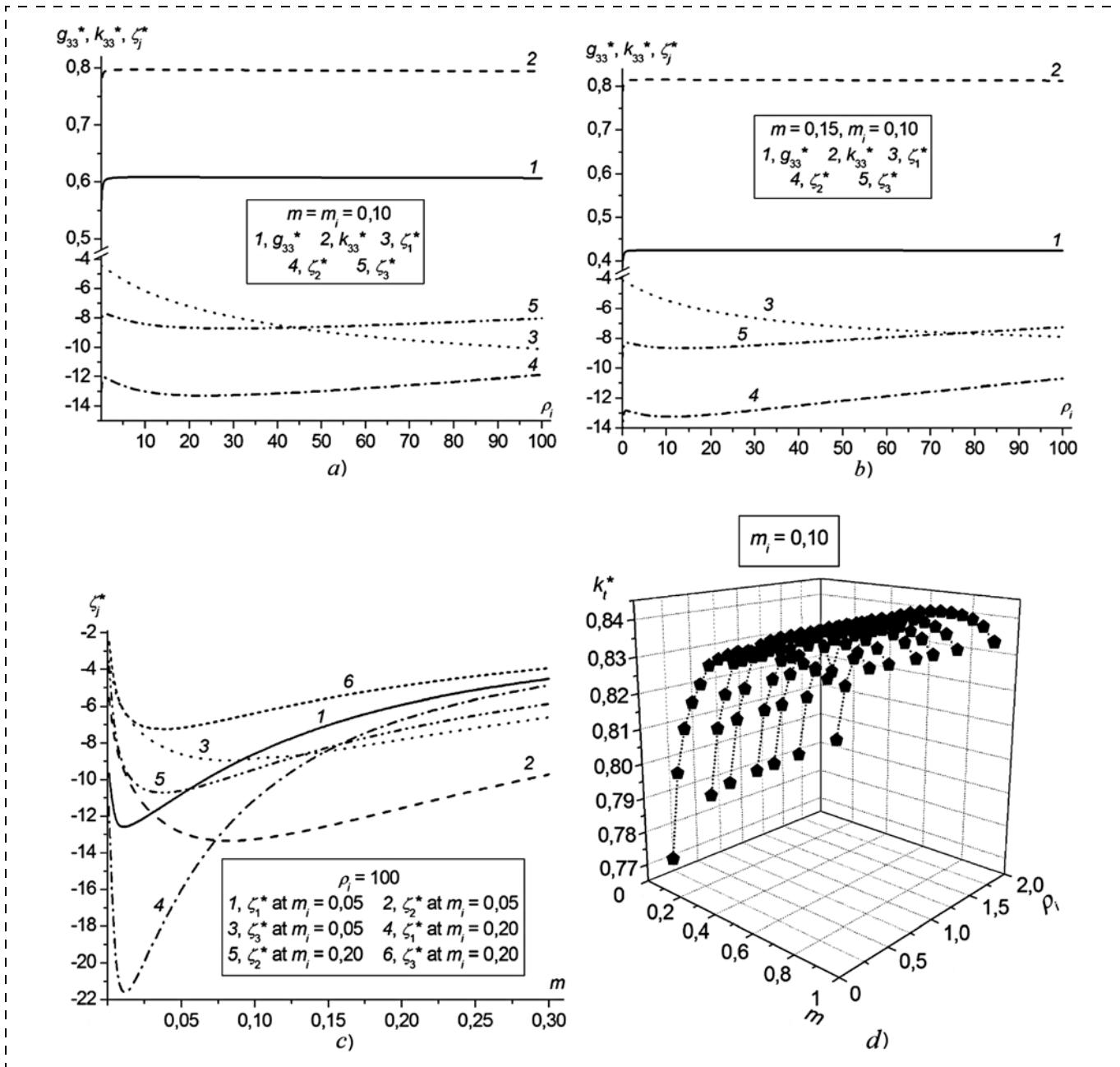


Рис. 2. Эффективные параметры 1—0—3-композита "кристиал KNN-T — кристалл LBO — полиэтилен": а, б — факторы анизотропии ζ_j^* , пьезокоэффициент g_{33}^* (в В·м/Н), КЭС k_{33}^* при $m = m_i = 0,10$ (а) и $m = 0,15, m_i = 0,10$ (б); в — факторы анизотропии ζ_j^* при $\rho_i = 100$ и $m_i = \text{const}$; г — КЭС k_t^* в области максимума при $m_i = 0,10$

Fig. 2. Effective parameters of the 1—0—3 "KNN-T single crystal — LBO single crystal — polyethylene" composite: а, б — anisotropy factors ζ_j^* , piezoelectric coefficient g_{33}^* (in V·m/N), ECF k_{33}^* at $m = m_i = 0,10$ (а) and $m = 0,15, m_i = 0,10$ (б); в — anisotropy factors ζ_j^* at $\rho_i = 100$ and $m_i = \text{const}$; г — ECF k_t^* in the vicinity of maximum at $m_i = 0,10$

(ср. кривые 1 на рис. 2, а и б). Существенные изменения ζ_j^* наблюдаются при объемной концентрации кристалла KNN-T $m < 0,20$ (рис. 2, в), т.е. при значительном влиянии 0—3-матрицы на электромеханическую связь в 1—0—3-композите. Изменение взаимного расположения кривых 3—5 на рис. 2, б, по сравнению с рис. 2, а, связано с увеличением влияния кристалла KNN-T (при увеличе-

нии m) на ζ_j^* из (1). Большая разность $s_{33}^{(0-3), E} - s_{11}^{(0-3), E}$ и отношение $|s_{33}^{(0-3), E}|/|s_{13}^{(0-3), E}| \gg 1$ (рис. 3) при $\rho_i \gg 1$ приводят к заметному ослаблению электромеханической связи вдоль осей OX_1 и OX_2 (см. рис. 1) и влияют на факторы анизотропии композита (1). Локальный $\max k_t^* \approx 0,84$ (см. рис. 2, г)

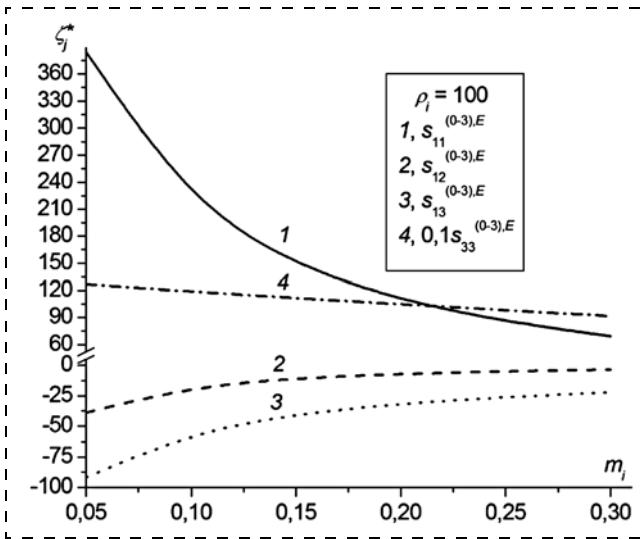


Рис. 3. Упругие податливости $s_{ab}^{(0-3),E}$ (в 10^{-12} Па $^{-1}$) 0—3-матрицы "кристалл LBO — полиэтилен" при $\rho_i = 100$. Фрагмент 0—3-матрицы схематически изображен на вставке рис. 1

Fig. 3. Elastic compliances $s_{ab}^{(0-3),E}$ (in 10^{-12} Pa $^{-1}$) of the 0—3 "LBO single crystal — polyethylene" matrix at $\rho_i = 100$. A fragment of the 0—3 matrix is schematically shown in the insert of fig. 1

находится вблизи $m = 0,70$ и $\rho_i = 1$, т.е. когда значительно влияние кристалла KNN-T на электромеханическую связь в композите и менее существенна упругая анизотропия 0—3-матрицы. В области локального $\max k_t^*$ (рис. 2, d) достигаются значения фактора анизотропии $\zeta_3^* \approx -6...-5$.

Характерной особенностью исследованного композита является наличие размытого локально-го $\max h_{33}^* \approx 1,54 \cdot 10^{10}$ В/м, наблюдающегося вблизи $m = 0,9$ в широком интервале ρ_i и m_i . График пьезокоэффициента h_{33}^* при $m_i = \text{const}$ и различных значениях ρ_i имеет вид, аналогичный графику КЭС k_t^* на рис. 2, d. Учитывая формулы, приведенные в работах [6, 7], можно показать, что h_{33}^* и k_t^* связаны соотношением

$$h_{33}^* / k_t^* = (c_{33}^{*D} / \varepsilon_{33}^{*\xi})^{1/2}. \quad (3)$$

Из анализа зависимостей модуля упругости c_{33}^{*D} и диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{33}^{*\xi}$ от объемной концентрации кристаллических стержней m следует, что c_{33}^{*D} и $\varepsilon_{33}^{*\xi}$ монотонно возрастают в широком интервале m . Вследствие выполнения условия (3) локальный $\max h_{33}^*$ смещается по оси m относительно локального $\max k_t^*$ при $m_i = \text{const}$ и $\rho_i = \text{const}$.

Примечательно, что пьезокоэффициенты h_{33}^* и e_{33}^* проходят через максимумы при $0,85 < m < 0,95$, $\rho_i = \text{const}$ и $m_i = \text{const}$, т.е. при слабом влиянии 0—3-матрицы на пьезочувствительность композита. Данные табл. 3 свидетельствуют о существенном размытии $\max h_{33}^*$, а также о большой анизотропии $\zeta_4^* = h_{33}^*/h_{31}^*$ вблизи локальных $\max h_{33}^*$. Большая анизотропия h_{31}^* и e_{31}^* свойственна композитам типа 1—3 [6] и связана с электромеханическим взаимодействием стержней внутри матрицы (см. рис. 1).

Исследованный бессвинцовый 1—0—3-композит имеет преимущества по сравнению с анизотропными СЭ керамиками типа PbTiO₃ [5], текстурированными материалами на основе PbTiO₃ [10] и другими материалами [11—15]. Например, керамика модифицированного PbTiO₃ характеризуется отношениями $d_{33}/|d_{31}| = 8,2$ и $k_{33}/|k_{31}| = 8,0$ при $d_{33} = 56$ пКл/Н, $k_{33} = 0,48$ и $k_t = 0,43$ [5], а для 1—0—3-композита определены более высокие значения $d_{33}^* \approx 10^2$ пКл/Н, k_{33}^* и k_t^* (рис. 2, a, b, d). Для текстурированного модифицированного PbTiO₃ найдены наибольшие значения $g_{33} = 0,115$ В·м/Н и $g_{33}/|g_{31}| = 11$ [10]. В то же время значения g_{33}^* композита (см. рис. 2, a, b) в несколько раз превышают g_{33} текстурированного модифицированного

Таблица 3
Table 3
Интервалы объемных концентраций кристалла KNN-T [$m_1; m_2$],
в которых выполняется условие $1,53 \cdot 10^{10}$ В/м $< h_{33}^* < 1,55 \cdot 10^{10}$ В/м 1-0-3-композита "кристалл KNN-T —
кристалл LBO — полиэтилен" при $m_i = 0,10$,
и значения фактора анизотропии ζ_4^* в интервалах [$m_1; m_2$]
для этого композита)

Ranges of the volume fraction of KNN-T crystal [$m_1; m_2$], in which the condition $1,53 \cdot 10^{10}$ V/m $< h_{33}^* < 1,55 \cdot 10^{10}$ V/m is valid for the 1—0—3 composite "KNN-T single crystal — LBO single crystal — polyethylene" at $m_i = 0,10$, and values of the anisotropy factor ζ_4^* in the [$m_1; m_2$] ranges for this composite)

ρ_i	[$m_1; m_2$]	[$\zeta_4^*(m_1); \zeta_4^*(m_2)$]
0,1	[0,872; 0,977]	[-40,9; -8,40]
0,5	[0,703; 0,955]	[-90,7; -14,9]
1	[0,696; 0,953]	[-89,6; -15,0]
2	[0,692; 0,974]	[-85,2; -8,42]
5	[0,696; 0,969]	[-72,0; -8,56]
10	[0,708; 0,961]	[-56,6; -8,74]
20	[0,735; 0,944]	[-38,7; -9,26]

Note: ζ_4^* increases monotonously in the [$m_1; m_2$] ranges

PbTiO_3 , а фактор анизотропии ζ_1^* , связанный с g_{31}^* композита, удовлетворяет условию $|\zeta_1^*| \approx 20$ (см. кривую 4 на рис. 2, c).

Бессвинцовый 1—3-композит на основе СЭ керамики $(\text{Na}, \text{K})\text{NbO}_3$ характеризуется $\max g_{33}^* \approx \approx 0,24 \text{ В} \cdot \text{м}/\text{Н}$ и $\max k_t^* \approx 0,5$ [11], однако эти значения меньше соответственно g_{33}^* и k_t^* композита (см. рис. 2, a, b, d). Значения $h_{33}^* \approx 1,5 \cdot 10^{10} \text{ В}/\text{м}$ (см. табл. 3) существенно превышают значения $\max h_{33}^* \approx 10^9 \text{ В}/\text{м}$ 1—3-композитов "кристалл $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - x\text{PbTiO}_3$ — полимер" [12] при молярных концентрациях x из области морфотропного перехода. Модули факторов анизотропии (рис. 2, c) в ряде случаев превышают аналогичные параметры 1—0—3-композитов на основе свинецодержащих СЭ керамик [13]. Пьезоэффициент $g_{33} = 0,220 \text{ В} \cdot \text{м}/\text{Н}$ СЭ керамики на основе $(\text{K}_{0,5}\text{Na}_{0,5})\text{NbO}_3$ [14] меньше значений g_{33}^* композита (см. рис. 2, a, b), а фактор анизотропии $g_{33}/g_{31} = -21,2$ этой же керамики [14] соизмерим с ζ_1^* 1—0—3-композита (см. рис. 2, c). Для 1—3-композита на основе кристалла $0,70\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0,30\text{PbTiO}_3$, поляризованного вдоль направления [001], найдены значения $\max k_t^* \approx 0,80$ (эксперимент), $\max g_{33}^* = 0,440 \text{ В} \cdot \text{м}/\text{Н}$ (расчет) и $g_{33}^* = (0,080...0,120) \text{ В} \cdot \text{м}/\text{Н}$ (эксперимент) [15]. Исследованный нами 1—0—3-композит характеризуется значениями $k_t^* \approx 0,80$ и более высокими значениями g_{33}^* (см. рис. 2, a, b).

Заключение

В работе исследованы пьезочувствительность и факторы анизотропии (1) нового бессвинцового композита типа 1—3. Сочетание кристаллических пьезоактивных компонентов (KNN-T и LBO) и пьезопассивного полимера приводит к выполнению условий (2) и к высокой продольной пьезочувствительности этого композита ($g_{33}^* \sim (0,1...1) \text{ В} \cdot \text{м}/\text{Н}$ и $h_{33}^* \approx 10^{10} \text{ В}/\text{м}$). Большую роль в нем играет электромеханическое взаимодействие между кристаллическими СЭ стержнями и гетерогенной матрицей при значительной упругой анизотропии матрицы. Исследованные пьезоэффициенты, КЭС и факторы анизотропии (1), удовлетворяющие условиям (2), благоприятствуют применению бесчинцового композита в качестве активного элемента пьезоэлектрических сенсоров, преобразователей и гидроакустических устройств.

Авторы благодарны д-ру техн. наук., проф. Паничу А. Е., д-ру техн. наук., проф. Нестерову А. А. и канд. техн. наук Доле В. К. (ЮФУ, г. Ростов-на-Дону) за большой интерес к тематике исследований новых СЭ и пьезоэлектрических материалов.

Исследования проведены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации комплексного проекта "Разработка и создание высокотехнологичного производства мобильного гидроакустического комплекса освещения обстановки в различных акваториях Мирового океана на основе современных пьезоэлектрических средств нового поколения" (Договор № 03.G25.31.0276 от 29.05.2017) с использованием оборудования ЦКП "Высокие технологии" ЮФУ.

Список литературы

- Yang J., Zhang F., Yang Q. et al. Large piezoelectric properties in KNN-based lead-free single crystals grown by a seed-free solid-state crystal growth method // Applied Physics Letters. 2016. Vol. 108, N. 18. P. 182904—4 p.
- Zheng L., Huo X., Wang R. et al. Large size lead-free $(\text{Na}, \text{K})(\text{Nb}, \text{Ta})\text{O}_3$ piezoelectric single crystal: growth and full tensor properties // CrystEngComm. 2013. Vol. 15, N. 38. P. 7718—7722.
- Huo X., Zheng L., Zhang R. et al. A high quality lead-free (Li, Ta) modified $(\text{K}, \text{Na})\text{NbO}_3$ single crystal and its complete set of elastic, dielectric and piezoelectric coefficients with macroscopic $4mm$ symmetry // CrystEngComm. 2014. Vol. 16, N. 42. P. 9828—9833.
- Hong C.-H., Kim H.-P., Ghoi D.-Y. et al. Lead-free piezoceramics — Where to move on? // Journal of Materomics. 2016. Vol. 2, N. 1. P. 1—24.
- Xu Y. Ferroelectric materials and their applications. Amsterdam, London, New York, Toronto: North-Holland, 1991. 391 p.
- Topolov V. Yu., Bisegna P., Bowen C. R. Piezo-active composites. Orientation effects and anisotropy factors. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. 169 p.
- Ikeda T. Fundamentals of piezoelectricity. Oxford: Oxford University Press, 1990. 280 p.
- Adachi M., Shiosaki T., Kobayashi H. et al. Temperature compensated piezoelectric lithium tetraborate crystal for high frequency surface acoustic wave and bulk wave device applications // Proc. of 1985 IEEE Ultrasonics Symposium. New York: IEEE, 1985. P. 228—232.
- Evans K. E., Alderson K. L. The static and dynamic moduli of auxetic microporous polyethylene // Journal of Materials Science Letters. 1992. Vol. 11, N. 24. P. 1721—1724.
- Yan Y., Zhou J. E., Maurya D. et al. Giant piezoelectric voltage coefficient in grain-oriented modified PbTiO_3 // Nature Communications. 2016. V. 7. P. 13089—10 p.
- Shen Z. Y., Xu Y., Li J.-F. Fabrication and electromechanical properties of microscale 1—3-type piezoelectric composites using $(\text{Na}, \text{K})\text{NbO}_3$ -based Pb-free piezoceramics // Journal of Applied Physics. 2009. V. 105, N. 10. P. 104103—4 p.
- Bezus S. V., Topolov V. Yu., Bowen C. R. High-performance 1—3-type composites based on $(1-x)\text{Pb}(A_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - x\text{PbTiO}_3$ single crystals ($A = \text{Mg}, \text{Zn}$) // Journal of Physics D: Applied Physics. 2006. Vol. 39, N. 9. P. 1919—1925.

13. Тополов В. Ю., Филиппов С. Е., Воронцов А. А. Пьезоэффект и анизотропия электромеханических свойств новых 1—0—3-композитов на основе сегнетопьезокерамики // Нано- и микросистемная техника. 2011. N. 9. С. 13—19.
14. Гусакова Л. Г., Погибко В. М., Спиридонов Н. А. и др. Бессвинцовыйnanoструктурный пьезокерамический материал на основе (K, Na)NbO₃ // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии (Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies). 2012. Vol. 10, N. 2. P. 303—312.
15. Wang F., He C., Tang Y. et al. Single-crystal 0.7Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ — 0.3PbTiO₃ / epoxy 1—3 piezoelectric composites prepared by the lamination technique // Materials Chemistry and Physics. 2007. Vol. 105, N. 2—3. P. 273—277.

V. Yu. Topolov, D. Sc., Professor, vutopolov@sedu.ru, **A. N. Isaeva**, Student, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Corresponding author:

Topolov V. Yu., Professor, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation, vutopolov@sedu.ru

Piezoelectric Sensitivity and Anisotropy Factors of the Lead-free 1—0—3 Composite Based on (K, Na)(Nb, Ta)O₃ Single Crystal

Received on November 02, 2017
Accepted on November 27, 2017

At the study of the novel 1—0—3 (K, Na)(Nb, Ta)O₃ single crystal / Li₂B₄O₇ single crystal / polyethylene composite demonstrated an important role of the Li₂B₄O₇ single crystal / polyethylene matrix in the formation of a high piezoelectric sensitivity of the composite ($g_{33}^ \sim (0.1...1) V \cdot m/N$, $h_{33}^* \sim 10^{10} V/m$), large anisotropy of the piezoelectric moduli ($d_{33}^*/|d_{31}^*| = g_{33}^*/|g_{31}^*| \gg 1$) and electromechanical coupling factors ($k_{33}^*/|k_{31}^*| \gg 1$ and $k_t^*/|k_p^*| \gg 1$ at $k_{33}^* \approx k_t^* \approx 0.7...0.8$). It also demonstrated that three conditions for a large anisotropy were valid simultaneously in certain volume-fraction ranges. The composite is of interest as the active element of the piezoelectric transducers, sensors and hydroacoustic devices.*

Keywords: lead-free composite, ferroelectric single crystal, piezoelectric single crystal, polymer, piezoelectric coefficients, electromechanical coupling factors, piezoelectric sensitivity, anisotropy factors, (K, Na)(Nb, Ta)O₃, Li₂B₄O₇

For citation:

Topolov V. Yu., Isaeva A. N. Piezoelectric Sensitivity and Anisotropy Factors of the Lead-Free 1—0—3 Composite Based on (K, Na)(Nb, Ta)O₃ Single Crystal, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 157—166.

DOI: 10.17587/nmst.20.157-166

Introduction

Much attention is devoted to the research in the field of lead-free ferroelectric (FE) and piezoelectric materials [1—4], the properties and certain parameters of which can be better than those of the lead-containing materials [5], such as Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O₃-based ceramics, (1-x)Pb(A_{1/3}Nb_{2/3})O₃ — xPbTiO₃ single crystals, etc., where A = Mg; Zn. Notwithstanding a big number of publications concerning the lead-free FE and piezoelectric materials (see the data in the review [4]), in the literature there is no detailed description of the properties of the piezoelectric composites based on the lead-free FE single crystals, and no purposeful selection of the potential components. The aim of the present work is to analyze the piezoelectric properties, their anisotropy and the related parameters of the novel lead-free composite with two single-crystal components, and also to show advantages of this composite in comparison to the known FE materials.

Structure of the composite and its effective parameters

In the investigated composite the lengthy FE single-crystal rods are surrounded by "the piezoelectric single crystal — polymer" matrix (fig. 1). The centers of symmetry of the square bases of the rods are in the apices of the squares located in the plane (X_1OX_2). The crystallographic axes $X^{(1)}$, $Y^{(1)}$, $Z^{(1)}$ of each rod are orientated so, that $X^{(1)} \parallel OX_1$, $Y^{(1)} \parallel OX_2$, $Z^{(1)} \parallel OX_3$, while the spontaneous polarization of each rod is $P_s^{(1)} \uparrow\uparrow OX_3$. The composite matrix is a system of the spheroidal single-crystal inclusions in polymer (insert in fig. 1) and is characterized by 0—3 connectivity in terms of work [6]. At that, a_1 , $a_2 = a_1$, a_3 are the lengths of the semiaxes of the inclusion; $\rho_i = a_1/a_3$ is its aspect ratio, and the length of the largest semiaxis a_k is considerably less than the length of a side of the square in the rod basis. Orientation of the crystallographic axes $X^{(2)}$,

$Y^{(2)}$, $Z^{(2)}$ of the inclusions is set by conditions of $X^{(2)}\parallel OX_1$, $Y^{(2)}\parallel OX_2$, $Z^{(2)}\parallel OX_3$, and the centers of symmetry of the inclusions are in the apices of the rectangular parallelepipeds. The presence of one FE component (rods with $P_s^{(1)} \uparrow\downarrow OX_3$) facilitates polarization of the composite along the OX_3 axis, while the presence of the piezoelectric component in the matrix improves the electromechanical coupling in the "rods — matrix" system and influences the composite parameters. The studied composite (fig. 1) is described by 1—0—3 connectivity.

The electromechanical properties of the 0—3 matrix ($P^{(0-3)}(m_i, \rho_i)$ in the general form) are determined within the framework of the effective field method [6], and they are considered in calculation of the effective properties of the composite $P^*(m, m_i, \rho_i)$ by means of the matrix method [6]. Hereafter we will use an asterisk (*) for designation of the effective properties and parameters of the 1—0—3 composite. In both the above-mentioned methods the electromechanical interaction between the components is taken into consideration. The effective properties of the composite are represented by a full set of elastic compliances s_{ab}^{*E} at electric field $E = \text{const}$, piezoelectric moduli d_{fl}^* and dielectric permittivities $\varepsilon_{rr}^{*\sigma}$ at mechanical stress $\sigma = \text{const}$. By means of the formulas presented in works [6, 7], it is possible to find piezoelectric coefficients g_{kl}^* , e_{kl}^* and h_{kl}^* , electromechanical coupling factors (ECFs) $k_{3l}^* = d_{3l}^*/(\varepsilon_{33}^{*\sigma} s_{ll}^{*E})^{1/2}$ (longitudinal and cross-section oscillation modes at $l = 3$ and $l = 1$, respectively), $k_t^* = e_{33}^*/(c_{33}^{*D} \varepsilon_{33}^{*\xi})^{1/2}$ (thickness oscillation mode), $k_p^* = k_{31}^* [2s_{11}^{*E}/(s_{11}^{*E} + s_{12}^{*E})]^{1/2}$ (planar oscillation mode), and also anisotropy factors of the composite

$$\begin{aligned}\zeta_1^* &= d_{33}^*/d_{31}^*; \quad \zeta_2^* = k_{33}^*/k_{31}^* = \zeta_1^* (s_{11}^{*E}/s_{33}^{*E})^{1/2}; \\ \zeta_3^* &= k_t^*/k_p^*,\end{aligned}\quad (1)$$

where c_{33}^{*D} is the elastic modulus at the electric displacement $D = \text{const}$, and $\varepsilon_{33}^{*\xi}$ is dielectric permittivity at strain $\xi = \text{const}$.

Among the lead-free components, which are of interest, we consider the FE ($K_{0.562}Na_{0.438})(Nb_{0.768}Ta_{0.232})O_3$ (KNN-T) single crystal [2] poled along the [001] direction of a perovskite cell (constants in table 1), piezoelectric $Li_2B_4O_7$ (LBO) single crystal [8] and polyethylene [6, 9] (constants in table 2). LBO single crystal demonstrates a

unique elastic anisotropy at a low level of piezo-activity, and its elastic moduli $c_{ab}^{(2), E}$ are linked by ratios $c_{11}^{(2), E}/c_{12}^{(2), E} = 37.8$, $c_{11}^{(2), E}/c_{13}^{(2), E} = 4.04$ and $c_{11}^{(2), E}/c_{33}^{(2), E} = 2.38$ (table 2). Below we consider the specific features of the piezoelectric response, ECFs and anisotropy factors (1) of the 1—0—3 "KNN-T single crystal — LBO single crystal — polyethylene" composite. In this composite the piezoelectric KNN-T single crystal rods are surrounded by the 0—3 matrix, the piezoelectric properties of which are determined by the unidirectional LBO single-crystal inclusions.

Piezoelectric sensitivity and factors of anisotropy of the composite

The present research analyzes the effective properties of $P^*(m, m_i, \rho_i)$ and related parameters of the composite in the ranges of $0 < m < 1$, $0.05 \leq m_i \leq 0.30$ and $0.01 \leq \rho_i \leq 100$. At rather small volume concentrations of m and m_i of the single-crystal components (fig. 1) for the composite the conditions of the large anisotropy

$$|\zeta_j^*| \gg 1, \quad (2)$$

are satisfied, where $j = 1; 2; 3$ (fig. 2, a—c). Simultaneous validity of the three conditions (2) ensures a single-mode operation concerned with the longitudinal ($j = 1; 2$) or thickness ($j = 3$) oscillation modes of a piezoelectric element [7]. We should add, that owing to the tetragonal symmetry $4mm$ of the single-crystal components [2, 8], the anisotropy factor ζ_1^* from (1) can be presented as $\zeta_1^* = g_{33}^*/g_{31}^*$. Large values of $g_{33}^* \approx (0.1...1) \text{ V}\cdot\text{m/N}$ (curve 1 in fig. 2, a, b) are achieved at a rather low level of dielectric permittivity $\varepsilon_{33}^{*\sigma}$, the value of which is considerably influenced by $\varepsilon_{33}^{(0-3), \sigma}$ of the matrix and $\varepsilon_{33}^{(2), \sigma}$ of the LBO single-crystal in its composition. Large values of g_{33}^* at $|\zeta_1^*| \gg 1$ should be taken into account at evaluations of the hydrostatic piezoelectric coefficients and figures of merit, which play an important role in the hydrophones and hydroacoustic systems [6]. The ECF values $k_{33}^* \approx 0.8$ (curve 2 in fig. 2, a, b) and $k_t^* \approx 0.7...0.8$ (fig. 2, d) are achieved at a moderate for FE materials [5] value of the piezomodulus $d_{33}^{(1)}$ of the KNN-T single-crystal [2]. In the vicinity of the local max k_t^* (fig. 2, d) the condition of $k_t^* \approx k_{33}^*$ is true, which is typical of the 1—3 type composites [6].

From fig. 2, *a*, *b* it follows, that conditions (2) are simultaneously valid mainly at $\rho_i \gg 1$, i.e. in a case of the heavily oblate inclusions of the LBO single crystal. The system of such inclusions in polyethylene influences effectively the anisotropy of the elastic properties of the 0–3 matrix (fig. 3) even at rather small volume fractions of the LBO single crystal m_i . At that, the dielectric permeability of the 0–3 matrix $\varepsilon_{33}^{(0-3),\sigma}$ obeys the condition $\varepsilon_{33}^{(0-3),\sigma} \ll \varepsilon_{33}^{(2),\sigma}$. Conditions (2) at $\rho_i = 100$ (fig. 2, *c*) are valid, for example, for the composite, the longitudinal piezoelectric effect in which is characterized by the following parameters: $d_{33}^* = 146$ pC/N, $g_{33}^* = 0.611$ V·m/N, $k_{33}^* \approx k_t^* \approx 0.80$ (at $m = 0.10$ and $m_i = 0.05$) or $d_{33}^* = 153$ pC/N, $g_{33}^* = 0.326$ V·m/N, $k_{33}^* \approx k_t^* \approx 0.82$ (at $m = 0.20$ and $m_i = 0.05$). The decrease of g_{33}^* is due to the increase of $\varepsilon_{33}^{*\sigma}$ at the increase of m , and this trend is observed in a wide ρ_i range (curves 1 in fig. 2, *a* and *b*). Considerable changes of ζ_j^* are observed at the volume fraction of the KNN-T single crystal $m < 0.20$ (fig. 2, *c*), i.e. at a considerable influence of the 0–3 matrix on the electromechanical coupling in the 1–0–3 composite. The change of the mutual arrangement of curves 3–5 in fig. 2, *b* in comparison with fig. 2, *a* is connected with strengthening of the influence of the KNN-T single crystal (at an increase of m) on ζ_j^* from (1). The large difference $s_{33}^{(0-3),E} - s_{11}^{(0-3),E}$ and correlation $|s_{33}^{(0-3),E}/|s_{13}^{(0-3),E}| \gg 1$ (see fig. 3) at $\rho_i \gg 1$ result in an appreciable easing of the electromechanical coupling along the OX_1 and OX_2 axes (see fig. 1) and influence the anisotropy factors (1) of the composite. Local $\max k_t^* \approx 0.84$ (see fig. 2, *d*) is located close to $m = 0.70$ and $\rho_i = 1$, when the influence of the KNN-T single crystal on the electromechanical coupling in the composite is considerable and the elastic anisotropy of the 0–3 matrix is less pronounced. In the vicinity of the local $\max k_t^*$ (fig. 2, *d*) the values of the anisotropy factors of $\zeta_3^* \approx -6...-5$ are achieved.

A prominent feature of the studied composite is the presence of a fuzzy local $\max h_{33}^* \approx 1.54 \cdot 10^{10}$ V/m, observed close to $m = 0.9$ in a wide range of ρ_i and m_i . The behaviour of the piezoelectric coefficient h_{33}^* at $m_i = \text{const}$ and various values of ρ_i looks like the behaviour of the ECF k_t^* in fig. 2, *d*. Considering the for-

mulas from [6, 7], it is possible to show that h_{33}^* and k_t^* are linked by the following relation:

$$h_{33}^* / k_t^* = (c_{33}^{*D} / \varepsilon_{33}^{*\xi})^{1/2}. \quad (3)$$

From the dependencies of the elastic modulus of c_{33}^{*D} and dielectric permittivity $\varepsilon_{33}^{*\xi}$ on the volume fraction of the single-crystal rods m it follows that c_{33}^{*D} and $\varepsilon_{33}^{*\xi}$ increase monotonously in the wide m range. Due to validity of the condition (3) the local $\max h_{33}^*$ is displaced along the axis m in relation to the local $\max k_t^*$ at $m_i = \text{const}$ and $\rho_i = \text{const}$.

Interesting, that piezoelectric coefficients h_{33}^* and e_{33}^* go through their maxima at $0.85 < m < 0.95$, $\rho_i = \text{const}$ and $m_i = \text{const}$, that is, at a small influence of the 0–3 matrix on the piezoelectric sensitivity of the composite. The data in table 3 testify to a considerable diffusion of $\max h_{33}^*$, and also to a large anisotropy of $\zeta_4^* = h_{33}^*/h_{31}^*$ near the local $\max h_{33}^*$. The large anisotropy of h_{31}^* and e_{31}^* is typical of the 1–3 type composites [6] and is concerned with the electromechanical interaction of the rods inside the matrix (fig. 1).

The studied lead-free 1–0–3 composite has advantages in comparison to the anisotropic PbTiO₃-type FE ceramics [5] textured by materials based on PbTiO₃ [10] and other materials [11–15]. For example, the modified PbTiO₃ ceramic is characterized by $|d_{33}/d_{31}| = 8.2$ and $|k_{33}/k_{31}| = 8.0$ at $d_{33} = 56$ pC/N, $k_{33} = 0.48$ and $k_t = 0.43$ [5], while for the 1–0–3 composite higher values of $d_{33}^* \approx 10^2$ pC/N, k_{33}^* and k_t^* (fig. 2, *a*, *b*, *d*) are determined. For the textured modified PbTiO₃ the largest values were found to be $g_{33} = 0.115$ V·m/N and $|g_{33}/|g_{31}| = 11$ [10]. At the same time, the values of g_{33} of the composite (fig. 2, *a*, *b*) surpass g_{33} of the textured modified PbTiO₃ several times, while the anisotropy factor of ζ_1^* , concerned with g_{31}^* of the composite, satisfies the condition of $|\zeta_1^*| \approx 20$ (curve 4 in fig. 2, *c*). The lead-free 1–3 composite based on FE (Na, K)NbO₃ ceramics is characterized by $\max g_{33}^* \approx 0.24$ V·m/N and $\max k_t^* \approx 0.5$ [11], however, these values are less than those of g_{33}^* and k_t^* of the composite (see fig. 2, *a*, *b*, *d*). The values of $h_{33}^* \approx 1.5 \cdot 10^{10}$ V/m (table 3) surpass considerably $\max h_{33}^* \approx 10^9$ V/m of 1–3 composites "(1 – x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ – x PbTiO₃ single crystal —

polymer" [12] at the molar concentrations x from the area of the morphotropic phase transition. In a number of cases the moduli of the anisotropy factors (fig. 2, c) exceed the similar parameters of 1–0–3 composites based on the lead-containing ceramics [13]. The piezoelectric coefficient $g_{33} = 0.220 \text{ V} \cdot \text{m/N}$ of FE ceramics based on $(\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{NbO}_3$ [14] is less than the g_{33}^* values of the composite (fig. 2, a, b), while the anisotropy factor $g_{33}/g_{31} = -21.2$ of the same ceramics [14] is commensurable with ζ_1^* of 1–0–3 composite (fig. 2, c). For the 1–3 composite based on the $0.70\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0.30\text{PbTiO}_3$ single crystal poled along the [001] direction, the values of $\max k_t^* \approx 0.80$ (experiment), $\max g_{33}^* = 0.440 \text{ V} \cdot \text{m/N}$ (calculation) and $g_{33}^* = (0.080...0.120) \text{ V} \cdot \text{m/N}$ (experiment) were found [15]. The 1–0–3 composite studied by the authors is characterized by values of $k_t^* \approx 0.80$ and higher values of g_{33}^* (fig. 2, a, b).

Conclusion

In the work the authors studied the piezoelectric sensitivity and anisotropy factors (1) of a novel lead-free 1–3-type composite. A combination of the single-crystal piezo-active components (KNN-T and LBO) and of a piezo-passive polymer results in validity of the conditions (2) and high longitudinal piezoelectric sensitivity of this composite ($g_{33}^* \sim (0.1...1) \text{ V} \cdot \text{m/N}$ and $h_{33}^* \approx 10^{10} \text{ V/m}$). A leading role in it is played by the electromechanical interaction between the single-crystal FE rods and the heterogeneous matrix at a considerable elastic anisotropy of the matrix. The studied piezoelectric coefficients, ECFs and anisotropy factors (1), satisfying the conditions (2), are favorable for application of the lead-free composite as an active element of piezoelectric sensors, transducers and hydroacoustic devices.

The authors are grateful to Prof. A. E. Panich, D.Sc., Prof. A. A. Nesterov, D. Sc., and V. K. Dolya, Ph. D., (SFU, Rostov-on-Don) for their keen interest in the subjects of novel FE and piezoelectric materials.

Research was performed with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the complex project "Development and creation of a high-tech manufacture of a mobile hydroacoustic complex for an illumination of a situation in various water areas of the World Ocean on the basis of modern piezoelectric means of a new generation"

(Contract No. 03.G25.31.0276 of May 29th, 2017) with the use of an equipment of TsKP 'High Technologies', SFU.

References

1. Yang J., Zhang F., Yang Q. et al. Large piezoelectric properties in KNN-based lead-free single crystals grown by a seed-free solid-state crystal growth method, *Applied Physics Letters*, 2016, vol. 108, no. 18, pp. 182904–4 p.
2. Zheng L., Huo X., Wang R. et al. Large size lead-free $(\text{Na}, \text{K})(\text{Nb}, \text{Ta})\text{O}_3$ piezoelectric single crystal: growth and full tensor properties, *CrystEngComm.*, 2013, vol. 15, no. 38, pp. 7718–7722.
3. Huo X., Zheng L., Zhang R. et al. A high quality lead-free (Li, Ta) modified $(\text{K}, \text{Na})\text{NbO}_3$ single crystal and its complete set of elastic, dielectric and piezoelectric coefficients with macroscopic $4mm$ symmetry, *CrystEngComm.*, 2014, vol. 16, no. 42, pp. 9828–9833.
4. Hong C.-H., Kim H.-P., Ghoi D.-Y. et al. Lead-free piezoceramics – Where to move on? *Journal of Materomics*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 1–24.
5. Xu Y. *Ferroelectric materials and their applications*. Amsterdam, London, New York, Toronto, North-Holland, 1991. 391 p.
6. Topolov V. Yu., Bisegna P., Bowen C. R. *Piezo-active composites. Orientation effects and anisotropy factors*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. 169 p.
7. Ikeda T. *Fundamentals of piezoelectricity*, Oxford: Oxford University Press, 1990. 280 p.
8. Adachi M., Shiosaki T., Kobayashi H. et al. Temperature compensated piezoelectric lithium tetraborate crystal for high frequency surface acoustic wave and bulk wave device applications, *Proceedings of 1985 IEEE Ultrasonics Symposium. New York: IEEE*, 1985. P. 228–232.
9. Evans K. E., Alderson K. L. The static and dynamic moduli of auxetic microporous polyethylene, *Journal of Materials Science Letters*, 1992, vol. 11, no. 24, pp. 1721–1724.
10. Yan Y., Zhou J. E., Maurya D. et al. Giant piezoelectric voltage coefficient in grain-oriented modified PbTiO_3 , *Nature Communications*, 2016, vol. 7, pp. 13089–10 p.
11. Shen Z. Y., Xu Y., Li J.-F. Fabrication and electromechanical properties of microscale 1–3-type piezoelectric composites using $(\text{Na}, \text{K})\text{NbO}_3$ -based Pb-free piezoceramics, *Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 105, no. 10, pp. 104103–4 p.
12. Bezus S. V., Topolov V. Yu., Bowen C. R. High-performance 1–3-type composites based on $(1-x)\text{Pb}(\text{A}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - x\text{PbTiO}_3$ single crystals ($\text{A} = \text{Mg}, \text{Zn}$), *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, vol. 39, no. 9, pp. 1919–1925.
13. Topolov V. Yu., Filippov S. E., Vorontsov A. A. Piezoeffekt i anizotropiya electromechanical svoistv novikh 1–0–3 kompositov na osnove segnetopiezoceramiki, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2011, no. 9, pp. 13–19.
14. Gusakova L. G., Poguibko V. M., Spiridonov N. A. et al. Bessvintsoviy nanostrukturiyi piezoceramiceskii material na osnove $(\text{K}, \text{Na})\text{NbO}_3$, *Nanosistemi, nanomateriali, nanotekhnologii*, 2012, vol. 10, no. 2, pp. 303–312 (in Russian).
15. Wang F., He C., Tang Y. et al. Single-crystal $0.7\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0.3\text{PbTiO}_3$ / epoxy 1–3 piezoelectric composites prepared by the lamination technique, *Materials Chemistry and Physics*, 2007, vol. 105, no. 2–3, pp. 273–277.

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 621.382, 621.389

DOI: 10.17587/nmst.20.167-174

И. К. Хмельницкий, канд. хим. наук, ст. науч. сотр., khmelnitskiy@gmail.com,
Н. И. Алексеев, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., **А. П. Бройко**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
В. Е. Каленов, инженер, **А. В. Корляков**, д-р техн. наук, директор НОЦ "Нанотехнологии",
А. В. Лагош, электроник, **А. О. Лившиц**, аспирант, **В. В. Лучинин**, д-р техн. наук, директор ИЦ ЦМИД
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Россия

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ИОННЫХ ПОЛИМЕР-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Поступила в редакцию 14.08.2017

Ионные полимер-полимерные композиты (ИППК) представляют собой новый класс органических электроактивных полимеров, которые могут использоваться для создания электромеханических преобразователей (актуаторов и сенсоров). По сути они представляют собой "развитие" ионных полимер-металлических композитов (ИПМК), в которых металлические электроды заменены электродами из органических проводящих полимеров на основе PEDOT:PSS.

Установлено, что ИППК-сенсоры характеризуются линейным откликом на механическое возбуждение в диапазоне деформаций изгиба 0,1...1 см. При воздействиях частотами 0,1...20 Гц амплитуда выходного сигнала практически неизменна. Чувствительность ИППК-сенсоров, пропитанных этиленгликолем, оказалась выше, чем чувствительность ИПМК-сенсоров.

В качестве актуаторов исследуемые ИППК-преобразователи показали долгое время реагирования, что связано с использованием этиленглиоля и ионной жидкости в качестве растворителей.

Ключевые слова: ионные полимер-полимерные композиты, ИППК-сенсоры, ИППК-актуаторы, Nafion, PEDOT:PSS

Введение

В последние годы ведутся интенсивные исследования инновационных материалов для гибких электромеханических преобразователей (актуаторов и сенсоров), причем особый интерес вызывают электроактивные полимеры ввиду их гибкости и легкости [1].

Одним из видов таких полимеров являются ионные полимер-металлические композиты (ИПМК), представляющие собой ионообменную мембрану, на которую с обеих сторон нанесены платиновые или золотые электроды [2]. Такие преобразователи характеризуются низким управляемым напряжением и высоким значением деформации изгиба, но имеют характерные недостатки. Будучи предварительно выдержаны в водном электролите, они при работе на воздухе высыхают и теряют работоспособность. При многократном изгибании преобразователя на электродах появляются трещины, через которые происходит утечка электро-

литы. Кроме того, электроды из благородных металлов дороги и требуют сложных методов формирования [3].

Одним из путей решения проблемы является применение более пластичных электродов. В качестве материалов таких электродов перспективны проводящие полимеры, которые уже доступны и характеризуются высокой проводимостью. Особый интерес представляют электроды из органических полимеров, которые можно наносить из растворов по относительно дешевым технологиям (центрифугирование, полив, погружение или печатные технологии). Такие структуры называют ионными полимер-полимерными композитами (ИППК) — по аналогии с ИПМК [4].

Целями данной работы являлись разработка и исследование электромеханических ИППК-преобразователей на основе ионообменной мембранны "Nafion 117" с электродами из поли(3,4-этилендиокситиофен)-полистиролсульфаната (PEDOT:PSS).

Нанесение электродов из PEDOT:PSS

В качестве исходного материала для изготовления полимерных электродов использовали водную суспензию PEDOT:PSS (рис. 1). Особенностью этого проводящего композита, хорошо растворимого в воде, являются высокая проводимость и технологичность.

Мембранные преобразователи, пропитанные водными растворами электролитов, в процессе работы при напряжениях выше 1,3 В теряют воду вследствие резистивного нагрева и электролиза. Эти проблемы можно преодолеть при использовании неводных растворителей, например этиленгликоля (ЭГ), который является полярным веществом, или 1-аллил-3-метилимидазония хлорида (АМИХ), являющегося ионной жидкостью (рис. 2) [4, 5].

Ионными жидкостями (ИЖ) называют соли, имеющие температуру плавления ниже 100 °C и состоящие из объемных органических катионов (имидалий, пиридиний, пиридиний и др.) и органических или неорганических анионов (тетрафторборат, гексафтормосфат, бромид). ИЖ электрохимически стабильны даже при напряжениях более 4 В и термически устойчивы до 400 °C [6]. Кроме того, и ЭГ, и ИЖ имеют высокую ионную проводимость, которая является одним из важ-

нейших свойств, необходимых для возбуждения ИППК-преобразователей.

Известно, что проводимость проводящих полимеров можно увеличить добавлением в их состав многоатомных спиртов (этанола, глицерина) или высококипящих растворителей (диметилсульфоксида, диметилформамида, тетрагидрофурана). В связи с этим можно ожидать, что применение в ИППК вместо воды ЭГ и ИЖ будет повышать проводимость пленок PEDOT:PSS [7].

Технология изготовления ИППК включает следующие основные стадии:

- обработка поверхности мембранны "Nafion 117" наждачной бумагой для улучшения адгезии осаждаемых пленок;
- удаление остаточной влаги из мембранны перед нанесением электродов путем выдержки сначала в сушильном шкафу (24 ч при 100 °C), а затем в вакуумной камере (3 ч при 25 °C);
- пропитка мембранны растворителем (ЭГ или смесь ЭГ + ИЖ (1:1)) в течение 3 ч при 60 °C (ЭГ) или 140 °C (смесь ЭГ + ИЖ);
- предварительный нагрев суспензии PEDOT:PSS до 150 °C для обеспечения нужной консистенции;
- нанесение на поверхность вымоченной в растворителе мембранны суспензии PEDOT:PSS методом полива с последующей сушкой на воздухе (для нанесения электрода на вторую сторону мембранны образец необходимо закрепить таким образом, чтобы первый электрод не соприкасался с поверхностью).

По такой технологии были получены преобразователи с электродами из PEDOT:PSS, пропитанные ЭГ и смесью ЭГ + ИЖ. Образцы, выдержаные в ЭГ, обладали сопротивлением 5 кОм, а выдержаные в смеси ЭГ + ИЖ — 15 кОм.

Полученные ИППК-структуры были разрезаны на полоски 2 × 0,5 и исследованы в качестве сенсоров и актиоаторов.

Исследование ИППК-сенсоров

Блок-схема установки для измерения параметров ИППК-сенсоров представлена на рис. 3 (см. третью сторону обложки). Исследуемый ИППК-сенсор, который использовали в качестве чувствительного элемента, закрепляли щупами Кельвина. Внешний вид центральной части измерительного стенда представлен на рис. 4 (см. третью сторону обложки).

Динамик, подключенный к генератору сигнала "Agilent 33500B", обеспечивал различные по амплитуде и частоте синусоидальные колебания исследуемого образца. Деформации изгиба регистрировали с помощью лазерного измерителя перемещений "L-GAGE". Щупы Кельвина для регистрации сиг-

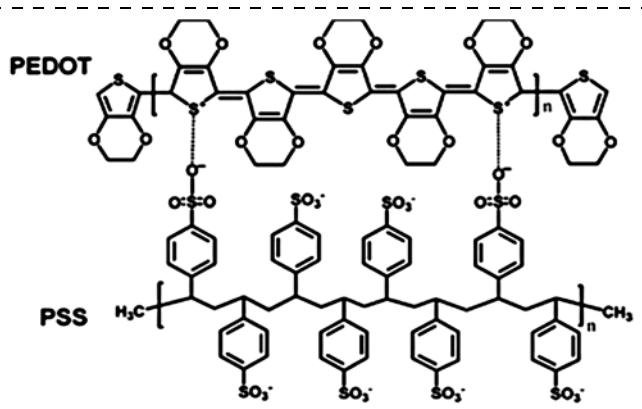


Рис. 1. Структурная формула PEDOT:PSS

Fig. 1. Structural formula of PEDOT:PSS

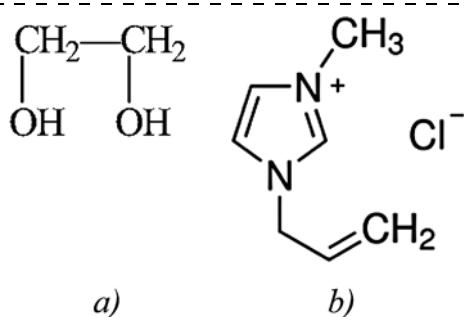


Рис. 2. Структурные формулы ЭГ (a) и АМИХ (b)

Fig. 2. Structural formulas of EG (a) and Amim-Cl (b)

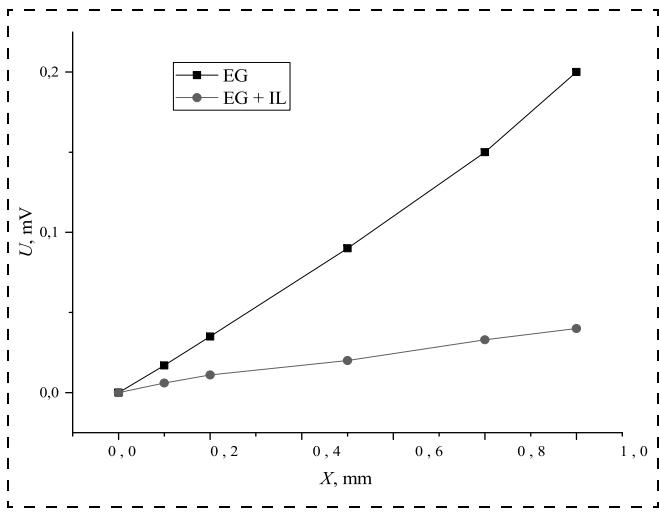


Рис. 6. Зависимость выходного сигнала от деформации изгиба ИППК-сенсоров

Fig. 6. Dependence of the output signal on the bending deformation of the IP²C sensors

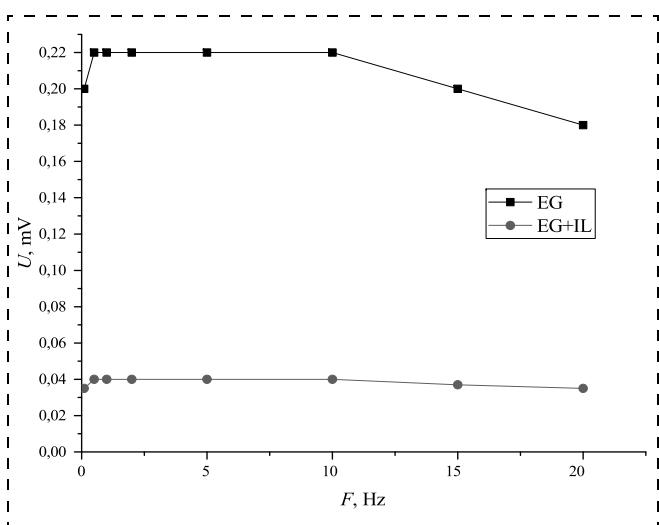


Рис. 7. Зависимости выходного напряжения ИППК-сенсора от частоты

Fig. 7. Dependences of the output voltage of the IP²C sensors on frequency

нала ИППК-сенсора были соединены с мультиметром "Agilent 34410A", через который информация поступала на ПК.

Поскольку полимер содержит закрепленные кислотные остатки SO_3^- , на его поверхности после пропитывания растворителем образуется двойной электрический слой и в электролите внутри мембранны преобладают свободные положительные ионы, поэтому движение ионов в мембране под действием электрического поля является односторонним. При внешнем изгибающем механическом воздействии на электродах сенсора возникает разность давлений, что приводит к движению потока заряженной жидкости в мембране от одного электрода к другому. Это, в свою очередь, приводит к

возникновению на электродах разности потенциалов [8].

Были исследованы зависимости выходного сигнала от частоты и амплитуды механических воздействий на сенсор.

На рис. 5 (см. третью сторону обложки) представлено семейство зависимостей амплитуды сигнала от времени для различных амплитуд перемещений при постоянной частоте (10 Гц) для сенсоров, выдержаных в ЭГ. Зависимости амплитуды сигнала от времени для сенсоров, выдержаных в смеси ЭГ + ИЖ, имели аналогичный вид.

По этим данным были построены зависимости амплитуды выходного сигнала от деформации изгиба (рис. 6).

Из рис. 6 видно, что ИППК-сенсоры с электродами из PEDOT:PSS характеризуются линейным откликом в исследуемом диапазоне амплитуд механических перемещений. Коэффициенты чувствительности, определенные по этим зависимостям, составили 0,2 мВ/мм для сенсора, выдержанного в ЭГ, и 0,04 мВ/мм для сенсора, выдержанного в смеси ЭГ + ИЖ.

Далее была исследована частотная зависимость амплитуды выходного сигнала при постоянном напряжении 10 В. Минимальная частота, при которой наблюдался сигнал от сенсора, составляет 0,1 Гц.

Зависимости амплитуды выходного сигнала от частоты при постоянном смещении 0,5 мм приведены на рис. 7. Видно, что в диапазоне 0,1...20 Гц амплитуда выходного сигнала практически неизменна, при этом зависимость выходного сигнала от времени имеет синусоидальный характер (см. рис. 5). Этот диапазон и является рабочим диапазоном частот исследуемого ИППК-сенсора.

Чувствительность ИППК-сенсоров, пропитанных ЭГ, оказалась выше, чем чувствительность ИПМК-сенсоров [8]. Время непрерывной работы ИППК-сенсоров также оказалось выше, чем ИПМК-сенсоров, вследствие использования неводных растворителей (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Сравнительная характеристика сенсоров
Comparison of characteristics of the sensors

Параметр Parameters	Вид сенсора Kinds of sensors		
	ИПМК IPMC	ИППК (ЭГ) IP ² C (EG)	ИППК (ЭГ + ИЖ) IP ² C (EG + IL)
Коэффициент чувствительности, мВ/мм Sensitivity coefficient, mV/mm	0,07	0,2	0,04
Время работы Time of work	1...2 сут. 1...2 days	>2 нед. >2 weeks	>2 нед. >2 weeks

Исследование ИППК-актиоаторов

На рис. 8 показана блок-схема стенда для исследования ИППК-актиоаторов. На исследуемый образец через щупы Кельвина подается напряжение от генератора сигналов "Agilent 33500B". С помощью лазерного измерителя перемещения "L-GAGE" измеряется деформация изгиба актиоатора. Изображение выводится на подсоединенный к лазерному измерителю перемещения осциллограф "Agilent DSOX3014A".

Принцип работы ИППК-актиоаторов основан на движении заряженной жидкости в мемbrane под действием электрического поля. Возникающий электроосмотический поток создает избыточное давление жидкости у одного из электродов, что вызывает изгиб актиоатора [2].

На рис. 9 представлены зависимости деформации изгиба ИППК-актиоатора от управляемого напряжения. Было установлено, что актиоатор, выдержаный в смеси ЭГ + ИЖ, начинает деформироваться при напряжениях от 0,4 В, а выдержанный в ЭГ — при 0,7 В.

Рабочий диапазон напряжений составляет 1...10 В (при более высоких напряжениях наблюдается пробой актиоатора).

ИППК-актиоаторы, пропитанные смесью ЭГ + ИЖ, показывают большие деформации изгиба, чем ИППК-актиоаторы, пропитанные ЭГ, но значительно меньшие, чем ИПМК-актиоаторы (табл. 2). Деформация ИППК-актиоаторов происходит медленнее, чем деформация ИПМК-актиоаторов, выдержанных в водных электролитах.

Из рис. 10 видно, что ИППК-актиоатор, выдержанный в смеси ЭГ + ИЖ, по скорости деформации изгиба превосходит актиоатор, выдержанный в ЭГ.

Время непрерывной работы ИППК-актиоаторов также оказалось выше, чем у ИПМК-актиоаторов, вследствие использования неводных растворителей.

Таблица 2
Table 2

Сравнение характеристик актиоаторов
Comparison of characteristics of the actuators

Параметр <i>Parameter</i>	Вид актиоатора <i>Kinds of actuators</i>		
	ИПМК IPMC	ИППК (ЭГ) <i>IP²C</i> (EG)	ИППК (ЭГ + ИЖ) <i>IP²C</i> (EG + IL)
Деформация сдвига, мм <i>Bending deformation, mm</i>	20	0,9	0,79
Время работы <i>Time of work</i>	10 мин <i>10 min</i>	>1 сут. <i>>1 day</i>	>1 сут. <i>>1 day</i>

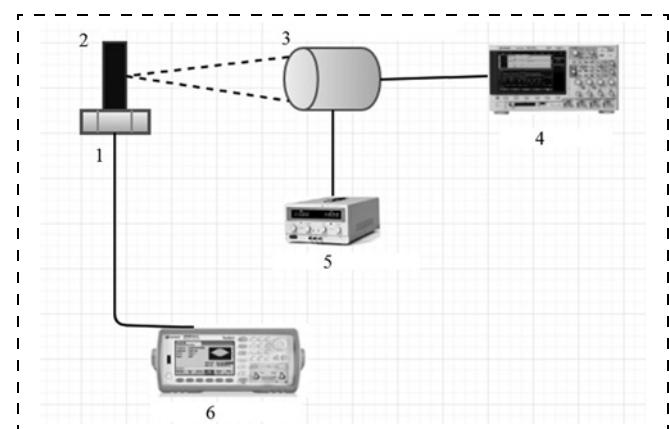


Рис. 8. Схема стенда для исследования ИППК-актиоаторов: 1 — щупы Кельвина; 2 — образец; 3 — лазерный измеритель перемещения; 4 — осциллограф; 5 — источник питания; 6 — генератор сигналов

Fig. 8. Scheme of the stand for research of the IP²C actuators: 1 — Kelvin rods; 2 — sample; 3 — laser instrument for measuring of displacements; 4 — oscilloscope; 5 — power supply; 6 — signal generator

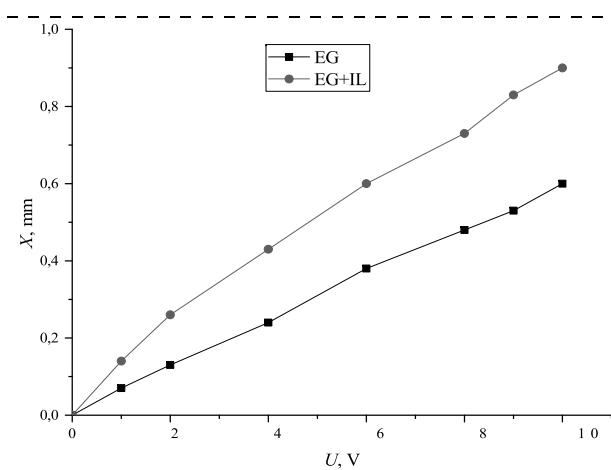


Рис. 9. Зависимости деформации изгиба ИППК-актиоаторов от подаваемого напряжения

Fig. 9. Dependences of the bending deformation of the IP²C actuators on the applied voltage

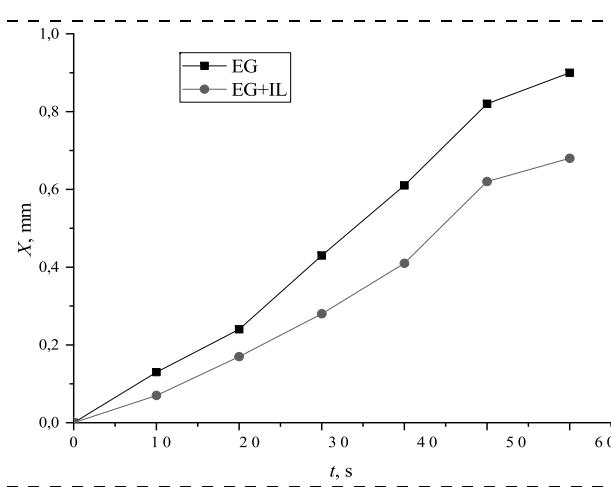


Рис. 10. Зависимости деформации изгиба ИППК-актиоаторов от времени при постоянном напряжении 10 В

Fig. 10. Dependences of the bending deformation of the IP²C actuators on time at the continuous voltage of 10 V

Заключение

Разработана технология изготовления ионных полимер-полимерных композитов (ИППК), представляющих собой новый класс органических электроактивных полимеров, которые можно использовать для создания электромеханических преобразователей (актиоаторов и сенсоров). Разработана методика измерения чувствительности ИППК-преобразователей с электродами из PEDOT:PSS.

Установлено, что ИППК-сенсоры характеризуются линейным откликом на механическое возбуждение в диапазоне деформаций изгиба 0,1...1 мм. При воздействиях частотами 0,1...20 Гц амплитуда выходного сигнала практически неизменна. Чувствительность ИППК-сенсоров, пропитанных ЭГ, оказалась выше, чем чувствительность ИПМК-сенсоров.

В качестве ИППК-актиоаторов исследуемые преобразователи показали долгое время реагирования, что связано с использованием ЭГ и ИЖ в качестве растворителей.

Исследование выполнено в рамках гранта РНФ (проект № 16-19-00107).

Список литературы

1. Каленов В. Е., Бройко А. П., Корляков А. В., Хмельницкий И. К. и др. Микродвижители для микроборотехники // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 12 (161). С. 41–46.
2. Корляков А. В., Хмельницкий И. К., Бройко А. П. и др. Актиоаторы на основе ионных полимер-металлических композитов // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 5. С. 277–285.
3. Корляков А. В., Хмельницкий И. К., Бройко А. П. и др. Разработка микроактиоаторов на основе электроактивных полимеров для биомиметических робототехнических систем // Биотехнога. 2015. № 6. С. 41–47.
4. Di Pasquale G., Fortuna L., Graziani S., La Rosa M., Pollicino A., Umana E. A study on IP²C actuators using ethylene glycol or EmI-Tf as solvent // Smart Materials and Structures. 2011, 20 (4), 045014 (9 p.).
5. Khmelnitskiy I., Vereschagina L., Kalyonov V. et al. Performance improvement of an ionic polymer-metal composite actuator by using DMSO as solvent // Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2016 El-ConRus-NW), February 2. — St. Petersburg, Russia. 2016. P. 59–62.
6. Kikuchi K., Tsuchitani S. Nafion®-based polymer actuators with ionic liquids as solvent incorporated at room temperature // J. Appl. Phys. 2009. 106, 053519.
7. Ouyang J., Xu Q., Chu C., Yang Y., Li G., Shinar J. On the mechanism of conductivity enhancement in poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) film through solvent treatment Polymer, 2004, 45 8443–50.
8. Хмельницкий И. К., Алексеев Н. И., Бройко А. П. и др. Исследование электромеханических ИПМК-сенсоров // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 1. С. 58–64.

I. K. Khmelnitskiy, Ph. D., Senior Researcher, khmelnitskiy@gmail.com, **N. I. Alekseyev**, D. Sc., Leading Researcher, **A. P. Broyko**, Ph. D., Senior Researcher, **V. E. Kalyonov**, Engineer, **A. V. Korlyakov**, D. Sc., Director of Nanotechnologies, **A. V. Lagosh**, Specialist in Electronics, **A. O. Livshitz**, Postgraduate student, **V. V. Luchinin**, D. Sc., Director of IC CMID St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin), Russia

Corresponding author:

Khmelnitskiy I. K., Ph. D., Senior Researcher, khmelnitskiy@gmail.com, St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin), Russia

Electromechanical Transducers Based on Ionic Polymer-Polymer Composites

Received on August 14, 2017

Accepted on September 12, 2017

Ionic polymer-polymer composites (IP²C) represent a new class of organic electroactive polymers that can be used to create electromechanical transducers (actuators and sensors). In fact, they represent "development" ionic polymer-metal composites (IPMC) where metal electrodes are replaced by electrodes with organic conductive polymers based on PEDOT:PSS.

It was determined that IP²C-sensors were characterized by a linear response to mechanical excitation in the range of bending deformations of 0.1 to 1 cm. Under the influence of frequencies of 0.1...20 Hz the amplitude of the output signal was almost unchanged. The sensitivity of IP²C-sensors impregnated with AG was higher than the sensitivity of IPMC sensors.

As actuators of the studied IP²C-transducers showed a long response time that is associated with the use of ethylene glycol and ionic liquid as solvents.

Keywords: Ionic polymer-polymer composites, IP²C-sensors, IP²C-actuators, Nafion, PEDOT:PSS

For citation:

Khmelnitskiy I. K., Alekseyev N. I., Broyko A. P., Kalyonov V. E., Korlyakov A. V., Lagosh A. V., Livshitz A. O., Luchinin V. V. Electromechanical Transducers based on Ionic Polymer-Polymer Composites, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 167–174.

DOI: 10.17587/nmst.20.167-174

Introduction

Nowadays, we witness an intensive research in the field of innovative materials for the flexible electromechanical transducers (actuators and sensors), at that, special interest is attracted to the electroactive polymers due to their flexibility and light weight [1].

Among such polymers are the ionic polymer-metal composites (IPMC) representing an ionic membrane, with platinum or gold electrodes deposited on its both sides [2]. Such transducers are characterized by a low control voltage and high value of the bending deformation, but they have typical drawbacks. Being preliminary kept in a water electrolyte, they dry up and lose their operability when operated in the air. A repeated bending of a transducer causes cracks on the electrodes and leaks of the electrolyte through them. Besides, the electrodes from precious metals are expensive and demand complex methods for their formation [3].

One of the ways to solve the problem is application of more plastic electrodes. In this capacity the conductive polymers, which are already available and characterized by a high conductivity, are promising. Of special interest are the electrodes from the organic polymers, which can be deposited from solutions with employment of rather cheap technologies (centrifugation, watering, immersion or printing technologies). Such structures are called ionic polymer-polymer composites (IP²C) — by analogy with IPMC [4].

The aim of the work was research and development of the electromechanical IP²C transducers on the basis of Nafion 117 ion-exchanging membrane with the electrodes from poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS).

Deposition of electrodes from PEDOT:PSS

As the initial material for manufacturing of the polymeric electrodes a water suspension of PEDOT:PSS was used (fig. 1). The specific features of this conductive composite, very soluble in water, are high conductivity and manufacturability.

The membranes of the transducers, impregnated with the water solutions of the electrolytes, during operation at voltages over 1.3 V lose the water because of the resistive heating and electrolysis. These problems can be overcome due to the use of the nonaqueous solvents, ethylene glycol (EG), for example, which is a polar substance, or 1-Allyl-3-methylimidazolium chloride (Amim-Cl), which is an ionic liquid (fig. 2) [4, 5].

Ionic liquids (IL) are the salts with the temperature of melting below 100 °C and consisting of the volume organic cations (imidazolinium, pyrrolidinium, pyridinium, etc.) and organic or inorganic anions (tetrafluoroborate, hexafluorophosphate, bromide). IL are electrochemically stable even at voltages over 4 V and are thermally stable at temperatures up to 400 °C [6]. Besides, EG and IL have high ionic conductivity,

which is one of the major properties necessary for excitation of the IP²C transducers.

As is known, the conductivity of the conductive polymers can be increased by adding to their structure of polyatomic spirits (ethylene glycol, glycerine) or high-boiling solvents (dimethyl sulfoxide, dimethyl formamide, tetrahydrofuran). In this connection it is possible to expect, that application of EG and IL in IP²C instead of water will raise the conductivity of PEDOT:PSS films [7].

The technology for manufacturing of IP²C includes the following basic stages:

- processing of the surface of Nafion 117 membrane by an emery paper for improvement of adhesion of the deposited films;
- removal of the residual moisture from the membrane before deposition of the electrodes by using a drying box (24 h at 100 °C) and then a vacuum chamber (3 h at 25 °C);
- impregnation of the membranes by a solvent (EG or a mix of EG + IL (1:1)) during 3 h at 60 °C (EG) or 140 °C (mix of EG + IL);
- preliminary heating of the PEDOT:PSS suspension up to 150 °C for obtaining of the necessary consistency;
- deposition of the PEDOT:PSS suspension on the surface of the membrane soaked in a solvent by the method of watering and subsequent drying of it in the air (for deposition of an electrode on the second side of the membrane, a sample should be fixed, so that the first electrode would not contact the surface).

Due to such a technology the transducers with the electrodes from PEDOT:PSS impregnated with EG and a mix of EG + IL were received. The samples kept in EG had resistance of 5 kΩ, while the ones kept in the mix of EG + IL — 15 kΩ.

The received IP²C structures were cut in strips of 2 × 0.5 and investigated as sensors and actuators.

Research of IP²C Sensors

A block diagram of an installation for measurement of the parameters of IP²C sensors is presented in fig. 3 (see the 3-rd side of cover). The investigated IP²C sensor, which was used as a sensitive element, was fixed by Calvin rods. Appearance of the central part of the measuring stand is presented in fig. 4 (see the 3-rd side of cover).

A loudspeaker, connected to Agilent 33500B signal generator, ensured various by amplitude and frequency sinusoidal fluctuations of the investigated sample. The bending deformations were recorded by means of L-GAGE, a laser instrument for measuring of displacements. The Calvin rods for recording of the IP²C sensor signals were connected to Agilent 34410A multimeter, through which information was transferred to a personal computer.

Since the polymer contains fixed acid residuals of SO_3^- , after its impregnation by a solvent a double electric layer is formed on its surface, while in the electrolyte, inside the membrane, free positive ions predominate, therefore, the movement of the ions in the membrane under the influence of the electric field is unilateral. Due to an external bending mechanical influence on the sensor electrodes a pressure difference appears, which moves a flow of the charged liquid in the membrane from one electrode to another. This, in turn, leads to occurrence of a potential difference on the electrodes [8].

The dependences of the output signal on the frequency and the amplitude of the mechanical influences on the sensor were investigated.

Fig. 5 (see the 3-rd side of cover) presents a number of the dependences of the amplitude of a signal on time for various applied voltages at a constant frequency (10 Hz) for the sensors kept in EG. The dependences of the amplitude of a signal on time for the sensors kept in a mix of EG + IL looked similar.

On the basis of these data the dependences of the amplitude of the output signal on the bending deformation were constructed (fig. 6). It is visible that IP²C sensors with their electrodes from PEDOT:PSS are characterized by a linear response in the investigated range of the amplitudes of the mechanical displacements. The sensitivity coefficients defined by these dependences were equal to 0.2 mV/mm for the sensor kept in EG, and to 0.04 mV/mm for the sensor kept in the mix of EG + IL.

Then the frequency dependence of the amplitude of the output signal was investigated at the continuous voltage of 10 V. The minimal frequency, at which a signal from the sensor was observed, equaled to 0.1 Hz.

The dependences of the amplitude of the output signal on frequency at the constant displacement of 0.5 mm are presented in fig. 7. It is visible, that in the range of 0.1...20 Hz the amplitude of the output signal is practically invariable, at that, the dependence of the output signal on time has a sinusoidal character (see fig. 5). This range is also the working range of the frequencies of the investigated IP²C sensor.

The sensitivity of the IP²C sensors impregnated with EG appeared to be higher than the sensitivity of the IPMC sensors [8]. The time of the continuous work of the IP²C sensors also appeared to be longer than that of the IPMC sensors due to the use of the nonaqueous solvents (table 1).

Research of the IP²C actuators

Fig. 8 presents a block diagram of the stand for research of the IP²C actuators. From Aligent 33500B signal generator voltage is applied to the investigated sample through the Calvin rods. By means of L-GAGE laser instrument for measuring of displacements the

bending deformation of the actuator is measured. The image is presented by Agilent DSOX3014A oscilloscope connected to the laser instrument for measuring of displacements.

The principle of operation of the IP²C actuators is based on the movement of the charged liquid in the membrane under the influence of the electric field. The arising electroosmotic flow creates a superfluous liquid pressure at one of the electrodes, which causes a bend of the actuator [2].

Fig. 9 presents the dependences of the bending deformation of the IP²C actuator on the control voltage. It was observed that a deformation of the actuator, kept in the mix of EG + IL, started at the voltages from 0.4 V, while that of the actuator kept in EG — at 0.7 V.

The working range of the voltages was 1...10 V (at a higher voltage a breakdown of the actuator was observed).

The IP²C actuators impregnated with the mix of EG + IL demonstrate bigger bending deformations than the IP²C actuators, impregnated with EG, but considerably smaller deformations, than the IPMC actuators (table 2). Deformation of the IP²C actuators occurs more slowly, than the deformation of the IPMC actuators kept in the water electrolytes.

From fig. 10 it is visible, that the IP²C actuator kept in the mix of EG + IL surpasses the actuator kept in EG by the speed of the bending deformation. The time of continuous work of the IP²C actuators also appeared to be longer than that of IPMC actuators, owing to the use of the nonaqueous solvents.

Conclusion

A technology was developed for manufacturing of the ionic polymer-polymeric composites (IP²C), representing a new class of the organic electroactive polymers, which could be used for development of the electromechanical transducers (actuators and sensors). A technique for measurement of the sensitivity of the IP²C transducers with their electrodes from PEDOT:PSS was also developed.

It was established, that the IP²C sensors were characterized by the linear response to the mechanical excitations in the range of the bending deformations of 0.1...1 mm. When influenced by frequencies of 0.1...20 Hz, the amplitude of the output signal was practically invariable. The sensitivity of the IP²C sensors impregnated with EG appeared to be higher than the sensitivity of the IPMC sensors.

In the capacity of the IP²C actuators the investigated transducers demonstrated a long response time, which is connected with the use of EG and IL as the solvents.

The research was supported by RSF (project № 16-19-00107).

References

1. Kalenov V. E., Broyko A. P., Korliakov A. V., Khmelnitskiy I. K. i dr. Mikrosvizhiteli dlia mikrorobototekhniki, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 12 (161), pp. 41–46 (in Russian).
2. Korliakov A. V., Khmel'nitckii I. K., Broiko A. P. i dr. Aktuatorы на основе ионных полимеров-металлических композитов, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 5, pp. 277–285 (in Russian).
3. Korliakov A. V., Khmelnitskiy Luchinin V. V. i dr. Razrabotka mikroaktuatorov na osnove elektroaktivnykh polimerov dlia biomime-ticheskikh robototekhnicheskikh sistem, *Biotehnosfera*, 2015, no. 6, pp. 41–47 (in Russian).
4. Di Pasquale G., Fortuna L., Graziani S., La Rosa M., Pollicino A., Umana E. A study on IP²C actuators using ethylene glycol or EmI-Tf as solvent, *Smart Materials and Structures*, 2011, 20 (4), 045014 (9 p.).
5. Khmelnitskiy I., Vereschagina L., Kalyonov V. et al. Performance improvement of an ionic polymer-metal composite actuator by using DMSO as solvent, *Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2016 El-ConRusNW)*, February 2. — St. Petersburg, Russia, 2016, pp. 59–62.
6. Kikuchi K., Tsuchitani S. Nafion®-based polymer actuators with ionic liquids as solvent incorporated at room temperature, *J. Appl. Phys.*, 2009, 106, 053519.
7. Ouyang J., Xu Q., Chu C., Yang Y., Li G. and Shinar J. On the mechanism of conductivity enhancement in poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) film through solvent treatment *Polymer*, 2004, 45, pp. 8443–50.
8. Khmelnitskiy I. K., Alekseev N. I., Broyko A. P. i dr. Issledovanie elektromechanicheskikh IPMK-sensorov, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 58–64 (in Russian).

УДК 621.382

DOI: 10.17587/nmst.20.174-182

Дао Динь Ха, аспирант, e-mail: ha.dao.dinh@bsuir.by, В. Р. Стемпицкий, канд. техн. наук, доц., доц. каф., e-mail: vstem@bsuir.by,

Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники", Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА ХОЛЛА С РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ

Поступила в редакцию 12.09.2017

В рамках приборно-технологического моделирования исследовано влияние геометрических параметров активной области датчика Холла, изготавливаемого с использованием стандартного технологического КМОП-процесса, на его эксплуатационные характеристики: чувствительность, напряжение Холла, рассеиваемую мощность и остаточное напряжение. Предложены подходы к оптимизации исследованных конструктивных параметров датчика Холла, а также вариант построения эквивалентной схемы для моделирования схемотехнических решений на базе датчика Холла.

Ключевые слова: датчик Холла, геометрический поправочный коэффициент, магниточувствительный элемент, чувствительность, приборно-технологическое моделирование

Введение

В современной электронной технике нашли широкое применение датчики магнитного поля, используемые для измерения индукции магнитного поля, бесконтактного определения механических и электрических воздействий. Датчики магнитного поля применяют в автомобильной промышленности, мобильных и потребительских сегментах, медицине, аэрокосмической и морской отраслях, энергетике — в качестве датчиков камер и дисплеев, электронных компасов [1—7].

Одним из наиболее распространенных типов магниточувствительных элементов являются датчики, принцип действия которых основан на эффекте Холла — возникновении поперечной разности потенциалов при протекании тока по проводнику, находящемуся в поперечном магнитном поле. В электронике и различных областях датчики

Холла (ДХ) используют для контроля движения, положения, скорости, направления, тока, уровня и других параметров.

Важнейшей задачей, которая требует эффективного решения в рамках указанных научных и прикладных направлений, является усовершенствование конструктивных параметров магниточувствительных сенсоров в целях улучшения их эксплуатационных характеристик, включая разработку соответствующих методов приборно-технологического и схемотехнического моделирования и оптимизации в среде современных программных средств.

В работе представлены результаты исследования влияния геометрических параметров активной области (формы, отношения L/W , геометрического поправочного коэффициента G и др.) на эксплуатационные характеристики датчика Холла. Основные результаты получены с использованием

соответствующих модулей программного комплекса компании Silvaco [8].

Конструктивные решения датчиков Холла и принцип их работы

Одним из наиболее значимых конструктивных параметров сенсорных устройств, независимо от их назначения, является геометрия активной области. Для магниточувствительных сенсоров типа ДХ данный параметр является критически важным. В работах [3, 4] с использованием трехмерного моделирования исследовано влияние геометрии, формы, размеров и степени легирования различных областей на характеристики ДХ, включая напряжение Холла, чувствительность, остаточное напряжение и температурный коэффициент остаточного напряжения.

В работе [9] описывается ДХ с цифровым интерфейсом и чувствительностью по току до 310 В/(А · Тл), состоящий из крестообразной пластины и формирователя сигналов, изготовленный с использованием 0,18 мкм высоковольтной КМОП-технологии.

В работе [10] исследуются конструкция и схема обработки сигналов ДХ, работающего в режиме измерения тока. Для компенсации остаточного напряжения в структуре ДХ используется метод вращающегося тока. Применение малошумящего стабилизированного операционного усилителя обеспечивает высокую чувствительность (до 1660 В/(А · мТл)) и эффективную обработку сигнала для малых рабочих токов (не более 12 мкА).

В работе [11] описан интегрированный линейный датчик Холла, выполненный по 0,8 мкм высоковольтной КМОП-технологии, состоящий из высокочувствительного сенсора и формирователя сигнала, функционирующего на основе технологии динамической компенсации остаточного напряжения. Модулятор вращающегося тока стабилизирует выходное напряжение и улучшает надежность формирователя сигнала.

В работе [12] исследовано влияние концентрации примеси *p*-типа в активной области, длины *L*, ширины *W* и отношения *L/W* на характеристики крестообразного ДХ, а именно чувствительность и остаточное напряжение для различных конструкций. Представлена эквивалентная схема прибора, обеспечивающая повышенную точность определения остаточного напряжения.

В работе [13] описаны результаты трехмерного моделирования технологического процесса и электрических характеристик крестообразного вертикального ДХ, а также MAGFET (англ. Magnetic Field Effect Transistor), предложен подход к разработке электрической модели, реализованной на языке SPICE.

Различные подходы к реализации геометрии активной области датчика Холла представлены на рис. 1. Предполагается, что наличие гальваномагнитного эффекта Холла обуславливает эквивалентность (близость) характеристик функционирующих на его основе сенсорных структур, независимо от геометрии активной области. Учитывая дополнительные свойства и требования, предъявляемые

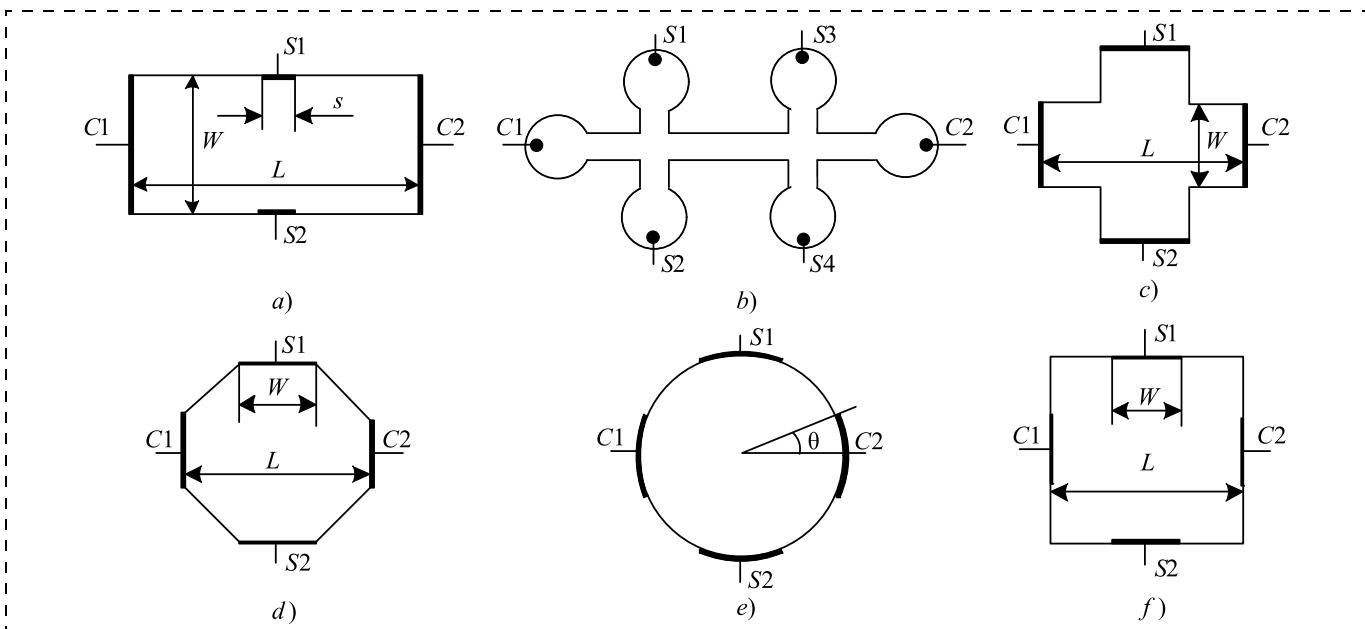


Рис. 1. Подходы к реализации геометрии активной области датчика Холла: *a* — прямоугольная форма; *b* — форма типа "мост"; *c* — крестообразная форма; *d* — восьмиугольная форма; *e* — круговая форма; *f* — квадратная форма; *L* — длина, *W* — ширина, *S1...S4* — выходные контакты, *C1*, *C2* — входные контакты

Fig. 1. Approaches to realization of the geometry of the active area of the Hall sensor: a — rectangular form; b — form of a "bridge" type; c — cruciform; d — octagonal form; e — circular form; f — square form; L — length, W — width, S1...S4 — output contacts, C1, C2 — input contacts

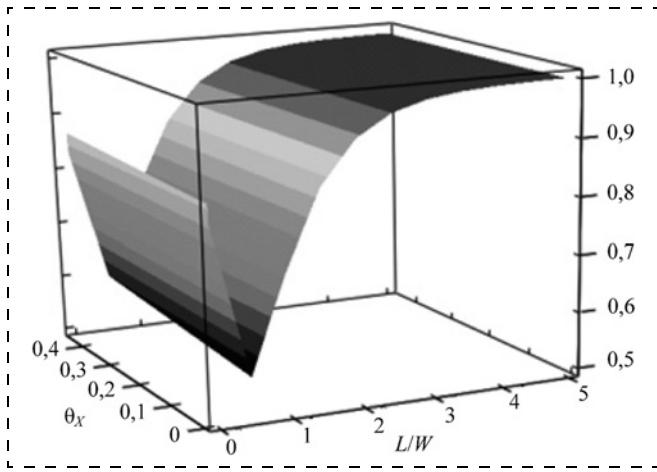


Рис. 2. Зависимость поправочного геометрического коэффициента от отношения L/W для различных значений угла Холла θ_X

Fig. 2. Dependence of the geometrical correction coefficient on L/W ratio for various values of the Hall angle θ_X

к конструктивным (используемые материалы и занимаемая на пластине площадь) и технологическим (простота изготовления, совместимость с используемым технологическим процессом) параметрам датчика, на практике часто применяют отличные от традиционных конфигурации активной области. При этом важно оценить достоинства и недостатки каждого из предлагаемых решений.

Пластина прямоугольной формы (рис. 1, *a*) является упрощенным описанием ленточной конструкции ДХ. Однако для достижения высокого значения геометрического поправочного коэффициента должны быть сделаны очень маленькие контакты $S_1 \dots S_2$. Конструкция типа "мост" (рис. 1, *b*) является реализацией бесконечно длинного холловского датчика. Напряжение Холла измеряется между одной или другой парой сенсорных контактов через мост ($S_1 - S_2$). Два точечных контакта вдоль моста ($S_1 - S_3$) используются для точного измерения падения напряжения вдоль образца. Четырехконтактные конструкции (рис. 1, *c-f*) обеспечивают высокий поправочный геометрический коэффициент G , оказывающий основное влияние на напряжение Холла.

На рис. 2 представлена зависимость поправочного геометрического коэффициента от отношения L/W для различных значений угла Холла θ_X , рассчитанная по формуле

$$G = 1 - \frac{16}{\pi^2} e^{-\frac{\pi L}{2W}} \left(1 - \frac{8}{9} e^{-\frac{\pi L}{2W}} \right) \left(1 - \frac{\theta_X^2}{3} \right).$$

Анализ зависимости, представленной на рис. 2, показал, что для $0 < L/W < 3$ геометрический поправочный коэффициент имеет максимальное значение 0,96, соответствующее отношению $L/W = 3$. Для $3 < L/W < 5$ максимум G , равный 0,99, дости-

гается при максимальном отношении $L/W = 5$. Следует отметить, что при $3 < L/W < 5$ верхний предел G начинает быстро возрастать от 0,96 до 0,99. Таким образом, поправка на конечную длину датчика относительно мала, поэтому не имеет смысла увеличивать это отношение. На практике обычно берется L/W от 2 до 3.

Одним из недостатков ДХ является наличие остаточного напряжения, которое возникает при отсутствии магнитного поля при включенном напряжении питания и связано с несовершенством и отклонениями технологического процесса изготовления и неоднородностью физических свойств материала активной области. Методы учета и минимизации остаточного напряжения подробно описаны в работах [1, 2]. Остаточное напряжение зависит от таких параметров, как технология изготовления, температура и механическое напряжение. Данная характеристика ограничивает минимально измеряемое магнитное поле.

Стандартная конструкция датчика Холла — так называемый греческий крест, который формируется симметрично и инвариантен относительно вращения на угол 90° . Это позволяет использовать метод вращающегося тока для минимизации остаточных напряжений. Традиционный способ уменьшения остаточного напряжения состоит в соединении двух или четырех одинаковых вращающихся ДХ [3]. В работе [4] проанализированы схемы, изготовленные по КМОП-технологии, основанные на методе вращающегося тока (периодические перестановки питания и выходных контактов) для повышения чувствительности датчика.

Исследуемые конструкции и методика моделирования

Исследуемая в работе конструкция датчика Холла сформирована на кремниевой подложке p -типа (концентрация бора 10^{15} см^{-3}) толщиной 5,0 мкм с активной областью n -типа толщиной 1,0 мкм, легированной мышьяком с концентрацией 10^{17} см^{-3} .

Геометрические и электрофизические параметры для рассматриваемых в работе структур ДХ приведены в табл. 1. Ширина контактов составляет 0,7 мкм, расстояние от контактов до границы n -типа — 0,35 мкм для крестообразных образцов и 3,5 мкм для прямоугольных. Позиция контактов по отношению к границам важна при анализе остаточного напряжения, поскольку ошибки контура могут привести к его увеличению.

Процессы переноса носителей заряда описываются фундаментальной системой уравнений и диффузионно-дрейфовыми моделями, которые включают уравнения непрерывности для электронов и дырок и уравнения Пуассона при воздействии электрических и магнитных полей [3, 14, 15]. Учет магнитного поля, воздействующего на активную

Таблица 1
Table 1

Геометрические и электрофизические параметры исследуемых конструктивных решений датчика Холла
Geometrical and electrophysical parameters of the investigated design solutions of the Hall sensor

Номер конструкции Number of Design	1	2	3	4
Геометрия активной области Geometry of the active area				
L , мкм L , μm	59,5	45,5	29,75	59,5
W , мкм W , μm	21,0	15,75	10,5	21,0
L/W	2,83	2,88	2,83	2,83
s , мкм s , μm	20,3	15,05	9,8	1,4
G	0,981	0,983	0,981	0,981
R_0 , кОм, при $T = 300$ К, $B = 0$ Тл R_0 , $k\Omega$, at $T = 300$ K, $V = 0$ T	3,04	2,92	2,23	3,35
Абсолютная чувствительность S , мВ/Тл при $I = 1$ мА <i>Absolute sensitivity S, mV/T at I = 1 mA</i>	133,0	132,0	104,0	133,0
Температурный коэффициент магнитной чувствительности, мкТл/°C <i>Temperature coefficient of the magnetic sen-</i> <i>sitivity, $\mu T/C$</i>	0,2	0,37	0,45	0,40
Номер конструкции Number of Design	5	6	7	8
Геометрия активной области Geometry of the active area				
L , мкм L , μm	59,5	59,5	59,5	59,5
W , мкм W , μm	21,0	59,5	59,5	21,0
L/W	2,83	1	1	2,83
s , мкм s , μm	20,3	5,6	20,3	2,8
G	0,981	0,725	0,725	0,981
R_0 , кОм, при $T = 300$ К, $B = 0$ Тл R_0 , $k\Omega$, at $T = 300$ K, $V = 0$ T	6,27	1,31	3,31	2,68
S , мВ/Тл, при $I = 1$ мА S , mV/T at $I = 1$ mA	280,0	65,5	136,0	86,0
Температурный коэффициент магнитной чувствительности, мкТл/°C <i>Temperature coefficient of the magnetic sen-</i> <i>sitivity, $\mu T/C$</i>	0,13	1,3	1,8	1,6

область приборной структуры ДХ и приводящего к возникновению напряжения Холла, осуществлялся на основе модели гальванического переноса.

Адекватные результаты моделирования могут быть получены только при правильном задании математических моделей описания физических процессов, происходящих в структуре полупроводниковых приборов: моделей подвижности, рекомбинации, статистики носителей заряда. Для описания статистики носителей заряда в комплексе Silvaco использовалась модель Больцмана, для

учета зависимости подвижности носителей заряда от концентрации — модель ударной ионизации Конканнона и для описания процессов рекомбинации — модель Шоттки — Рида — Холла [15].

Таблица 2
Table 2

Напряжение Холла для всех конструкций при $B = 0,5$ Тл
Hall voltage for all designs at $V = 0,5$ T

№	1	2	3	4	5	6	7	8
V_X , мВ	66,0	65,5	52,0	68,0	165,0	34,0	68,0	43,0

Результаты и их обсуждение

Для исследования эксплуатационных характеристик и поиска оптимальных конструктивных решений ДХ выполнена серия расчетов по приборно-технологическому моделированию технологического процесса изготовления, электрических и других характеристик приборной структуры с геометрическими конфигурациями активной области, представленными в табл. 1.

Исследование базовых характеристик ДХ. На рис. 3 представлены вольт-амперные характеристики датчика Холла для исследуемых конструкций активной области, полученные для индукции магнитного поля $B = 0,5$ Тл. Нелинейность вольт-амперной характеристики ДХ объясняется тремя основными механизмами: нелинейностью характеристик материала, геометрической нелинейностью и нелинейностью полевого эффекта $p-n$ -перехода. Нелинейность характеристик материала активной области и геометрическая нелинейность имеют квадратичную зависимость от значения индукции магнитной поля и при интеграции датчиков Холла могут компенсировать друг друга.

Зависимости напряжения Холла V_X от тока питания I при значении индукции магнитного поля $B = 0,5$ Тл представлены на рис. 4. Следует отметить, что крестообразные конструкции имеют одинаковое отношение L/W и отличаются только коэффициентом масштабирования.

В табл. 2 представлены значения напряжения Холла V_X исследуемых конструкций, рассчитанные для $B = 0,5$ Тл. Показано, что максимальное напряжение Холла обеспечивается для конструкции 5 с низким уровнем легирования активной области $V_X = 165,0$ мВ.

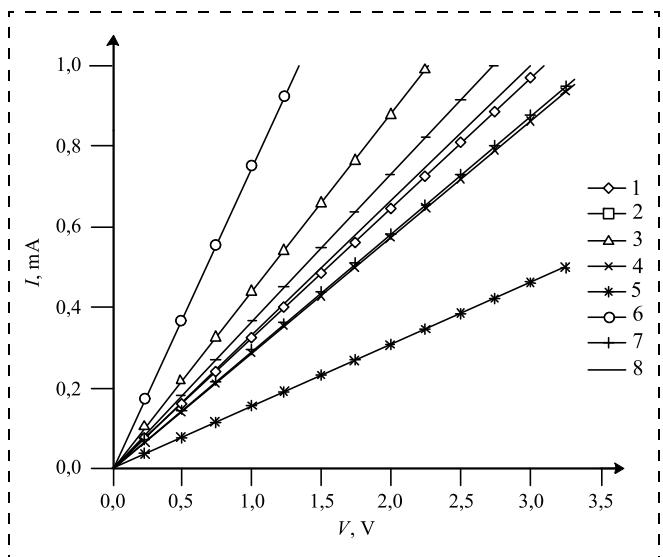


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики ДХ

Fig. 3. Volt-ampere characteristics of HS

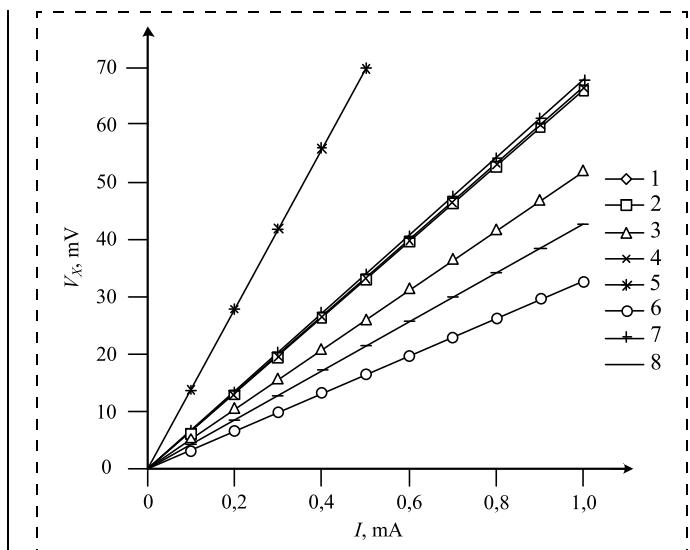


Рис. 4. Зависимости напряжения Холла от тока питания

Fig. 4. Dependences of the Hall voltage on supply current

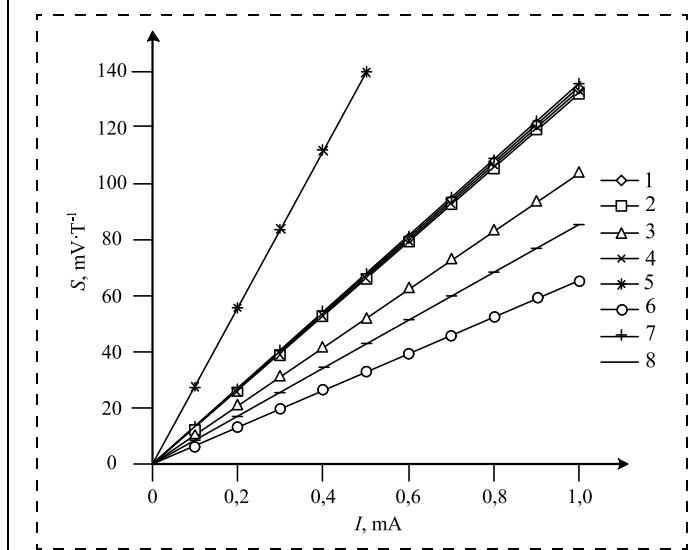


Рис. 5. Зависимости абсолютной чувствительности S от тока питания I

Fig. 5. Dependences of the absolute sensitivity S on the value of supply current I

На рис. 5—7 представлены зависимости чувствительности датчика Холла от тока питания I при значении индукции магнитного поля $B = 0,5$ Тл.

Показано, что чувствительность по току увеличивается с ростом тока питания, а чувствительность по напряжению уменьшается. Объяснением последнего механизма является факт, что S_V можно представить как отношение чувствительности по току к входному сопротивлению R , а знаменатель R увеличивается быстрее, чем S , с ростом тока питания. Наибольшие значения абсолютной чувствительности $S = 140$ мВ/Тл и чувствительности по току $S_I = 280$ В/(А · Тл) характерны для конструкции с низкой концентрацией примесей

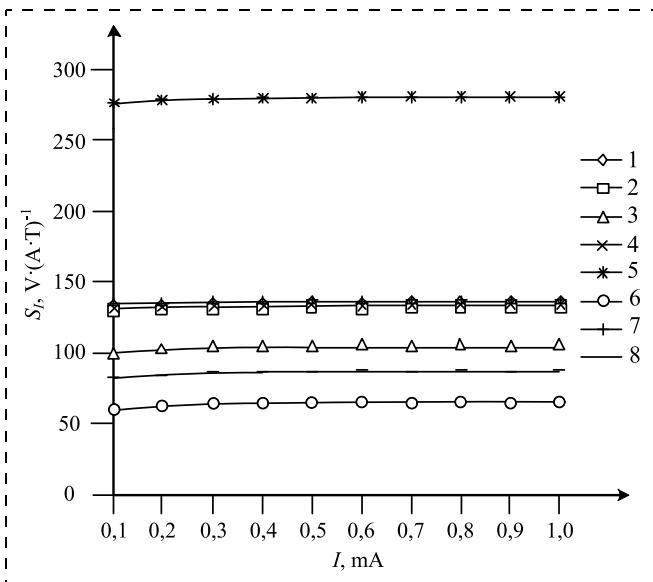


Рис. 6. Зависимости чувствительности по току S_I от тока питания I

Fig. 6. Dependences of sensitivity by current S_I on supply current I

$5,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; при этом прямоугольная конструкция обладает лучшей чувствительностью по напряжению $S_V = 0,048 \text{ В}/(\text{В} \cdot \text{Tl})$. Следует отметить, что результаты моделирования напряжения Холла и чувствительности ДХ находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными [3].

Анализ потребляемой мощности. Процесс выбора оптимальной конструкции ДХ основан на анализе поведения нескольких характеристик, таких как чувствительность, остаточное напряжение и рассеиваемая мощность. Для уменьшения остаточного напряжения применяют метод врачающегося тока, а для обеспечения высокой чувствительности уменьшают концентрацию носителей заряда в активной области [1, 2, 8, 9]. Таким образом, основным условием оптимизации является обеспечение максимальной чувствительности ДХ при минимальных значениях остаточного напряжения и рассеиваемой мощности.

Изменение чувствительности по мощности S_P в зависимости от рассеиваемой мощности P представлено в табл. 3.

Установлено, что крестообразные конструкции имеют наибольшую чувствительность по мощности, однако для данного конкретного достоинства геометрия имеет меньшее значение. Несложно предположить, что самая низкая рассеиваемая мощность обеспечивается при низком токе, однако это приводит к слишком низкому отношению сигнала к шуму.

Анализ остаточного напряжения. Остаточное напряжение является паразитным эффектом, который вносит вклад в общее напряжение Холла, снижая чувствительность датчика. Остаточное напряже-

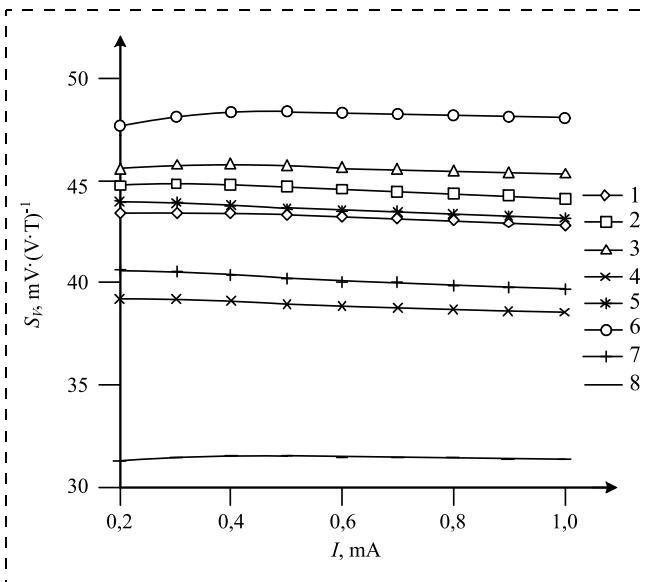


Рис. 7. Зависимости чувствительности по напряжению S_V от тока питания I

Fig. 7. Dependences of sensitivity by voltage S_V on supply current I

жение измерялось в отсутствие магнитного поля ($B = 0 \text{ Тл}$). Оно возникает вследствие несовершенства процессов изготовления, асимметрии (несоосности) контактов, неоднородности удельного сопротивления и толщины материала, а также механических напряжений в сочетании с эффектом пьезосопротивления. Анализ остаточного напряжения позволяет оценить степень влияния несоосности контактов на остаточное напряжение ДХ, что обеспечивает возможность определения геометрической конфигурации ДХ с наименьшим значением этой величины.

На рис. 8 показано, каким образом вносились асимметрии для крестообразных датчиков Холла, в первую очередь на смещающем контакте $l = 0,7 \text{ мкм}$.

Далее представлены результаты исследования остаточного напряжения, вызванного асимметрией смещающих (a и c) и чувствительных (b и d) контактов ДХ.

На рис. 9 представлены зависимости остаточного напряжения V_{off} от тока питания I . Установлено,

Таблица 3
Table 3

Мощность и чувствительность по мощности
при $B = 0,5 \text{ Тл}$ и $I = 1,0 \text{ mA}$
Power and sensitivity by power at $V = 0,5 \text{ T}$ and $I = 1,0 \text{ mA}$

Номер конструкции Number of the design	1	2	3	4	5	6	7	8
$P, \text{ мВт}$ $P, \text{ mW}$	3,08	2,95	2,25	3,38	6,30	1,35	3,30	2,70
$S_p, \text{ В/Вт} \cdot \text{Тл}$ $S_p, \text{ V/W} \cdot \text{Tl}$	43,0	44,1	45,3	38,5	43,1	48,1	39,7	31,3

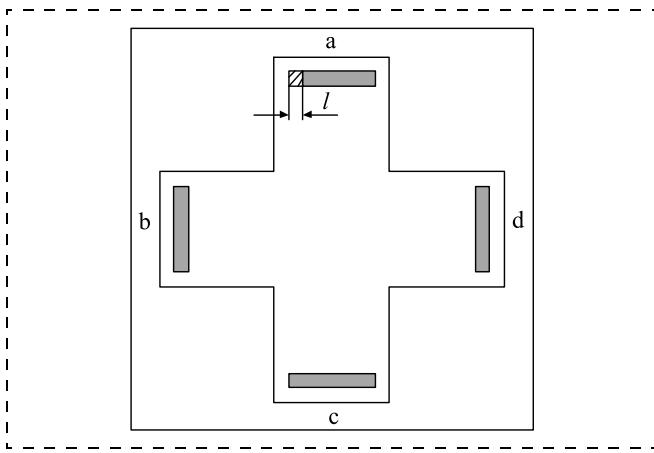


Рис. 8. Асимметрия (несоосность) контактов крестообразного ДХ
Fig. 8. Asymmetry (misalignment) of the contacts of the cruciform HS

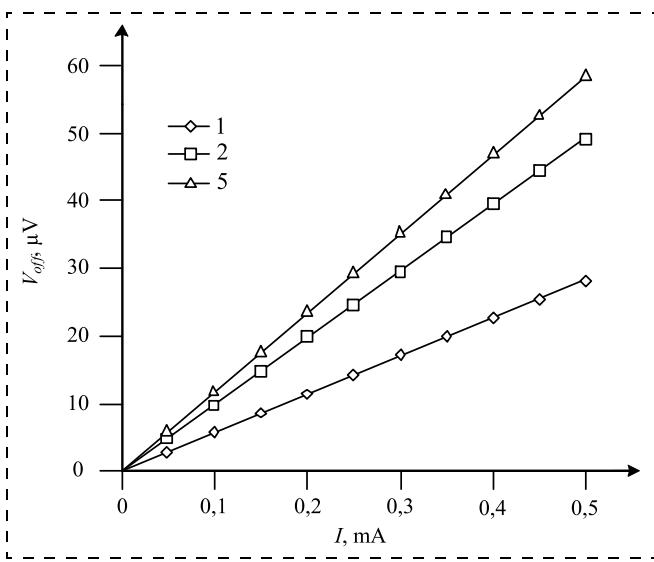


Рис. 9. Зависимости остаточного напряжения V_{off} от тока питания
Fig. 9. Dependences of the residual voltage V_{off} on the supply current

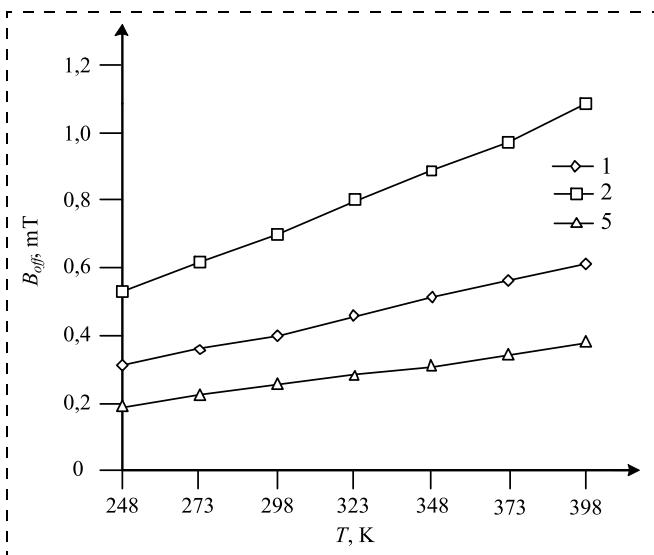


Рис. 10. Зависимости остаточного магнитного поля B_{off} от температуры
Fig. 10. Dependences of the residual magnetic field B_{off} on temperature

что для конструкции 1 несоосность контактов оказывает наименьшее влияние на остаточное напряжение, значение которого составило 2,8 мкВ. Увеличение размеров конструкции позволяет уменьшить ошибки на границах и, следовательно, минимизировать остаточное напряжение. На рис. 10 представлены зависимости остаточного магнитного поля B_{off} от температуры T . Конструкция 5, имеющая низкую концентрацию в активной области, имеет наименьшее значение остаточного магнитного поля $B_{off} = 0,19 \text{ мТл}$ и $B_{off} = 0,38 \text{ мТл}$ при $T = 248 \text{ К}$ и $T = 398 \text{ К}$ соответственно [3—4].

Эквивалентная схема ДХ для реализации электрической модели

Для практических применений чувствительный элемент (датчик Холла) обычно размещается со схемой обработки сигналов на одном кристалле. Однако конструктивная реализация такой системы остается проблемой, поскольку модели датчиков не включены в библиотеку проектирования, предоставляемую изготовителем чипа. Стандартные модели описания электрических характеристик ДХ слишком сложны [13] или идеализированы [18—20]. 2D- или 3D-физические модели, описываемые FEM-симуляторами, для интеграции с программами схемотехнического моделирования требуют значительных вычислительных затрат [13], но полезны для анализа влияния геометрических параметров на поведение датчика.

Для повышения эффективности проектирования, улучшения производительности системы необходимо иметь электрическую (SPICE) модель, адекватно описывающую характеристики чувствительного элемента. Такая модель описывает поведение датчика с использованием набора уравнений, полученного с помощью адекватных предположений и упрощений.

На рис. 11 представлена эквивалентная схема для описания электрической модели ДХ. Для идеальной конструкции (отсутствие технологического рассогласования и механического напряжения в системе) при измерении поверхностного сопротивления слоя R_S используется метод ван дер Пау (van der Pauw). Поскольку устройство симметрично, необходимо определить значения двух сопротивлений между контактами: R_D для сопротивления между двумя противоположными и R_H — между двумя соседними контактами [16]. По сравнению с существующими решениями [2] данная схема обеспечивает возможность учета гальваномагнитного и температурного эффектов.

Предлагаемая эквивалентная схема имеет четыре электрических вывода и один внешний источник в качестве входа (B) и включает следующие компоненты: восемь нелинейных резисторов, пред-

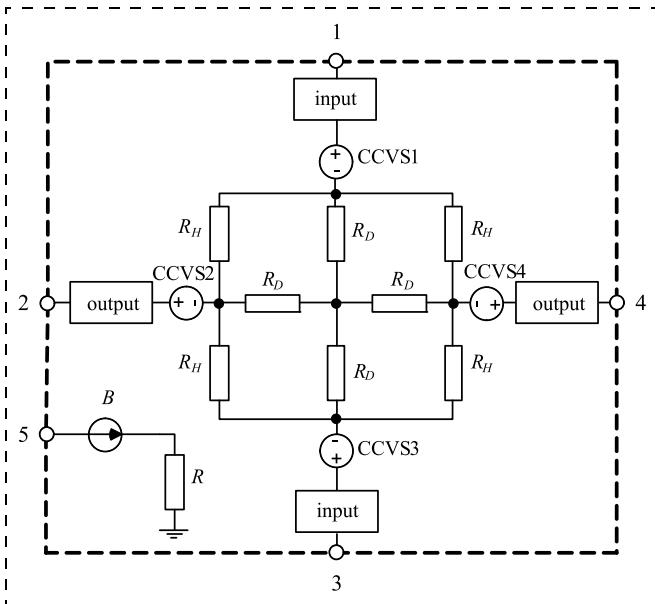


Рис. 11. Эквивалентная схема ДХ для реализации электрической модели на языке Verilog-A

Fig. 11. Equivalent circuit of HX for the electric model in Verilog-A language

назначенных для описания зависимостей характеристик ДХ от магнитного поля и температуры; четыре источника напряжения, управляемых током (CCVS — Current controlled voltage source), которые позволяют оценить вклады в напряжение Холла токов, протекающих через нелинейные сопротивления; четыре интерфейсных блока для моделирования последовательных сопротивлений.

Для практической реализации электрической (компактной) модели датчика возможно использование языка описания аналоговой аппаратуры Verilog-A [17].

Заключение

- В рамках приборно-технологического моделирования исследовано влияние геометрических параметров активной области датчика Холла на его эксплуатационные характеристики.
- Показано, что для отношения длины L к ширине W активной области от 0 до 3 геометрический поправочный коэффициент имеет максимальное значение 0,96 при $L/W = 3$; для отношения от 3 до 5 максимум G составляет 0,99 при $L/W = 5$.
- Установлено, что чувствительность по току увеличивается с ростом тока питания, а чувствительность по напряжению уменьшается. Наибольшие значения абсолютной чувствительности $S = 140 \text{ мВ/Тл}$ и чувствительности по току $S_I = 280 \text{ В/(A \cdot Тл)}$ характерны для конструкции с низкой концентрацией примесей $5,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, при этом прямоугольная конструкция обладает

лучшей чувствительностью по напряжению $S_V = 0,048 \text{ В/(B \cdot Тл)}$.

- Показано, что самая низкая рассеиваемая мощность обеспечивается при низком токе, но при этом отношение сигнала к шуму имеет слишком низкое значение.
- Установлено, что для крестообразной конструкции влияние несоосности контактов на остаточное напряжение имеет наименьшее значение, которое составило $2,8 \text{ мкВ}$. Увеличение геометрических размеров ДХ позволяет уменьшить ошибки на границах и минимизировать остаточное напряжение. Конструкция с низкой концентрацией в активной области имеет наименьшие значения остаточного магнитного поля $0,19$ и $0,38 \text{ мТл}$ при температурах 248 и 398 К соответственно.
- Предложен вариант построения эквивалентной схемы для моделирования схемотехнических решений на базе датчика Холла.

Список литературы

1. Popovic R. S. Hall Effect Devices. Institute of Physics Publishing: Bristol, UK. 2004. Second Edition. 420 p.
2. Ramsden E. Hall Effect Sensors — Theory and Applications. Elsevier: Burlington, MA, USA. 2nd ed. 2006. 272 p.
3. Paun M. A., Salles J. M., Kayal M. Comparative Study on the Performance of Five Different Hall Effect Devices // Sensors. 2013. Vol. 13. P. 2093–2112.
4. Paun M. A., Salles J. M., Kayal M. Hall Effect Sensors Design, Integration and Behavior Analysis // J. Sens. Actuator Netw. 2013. Vol. 2. P. 85–97.
5. Бараночников М. Л., Леонов А. В., Мальцев П. П., Мокрушин А. Д., Мордкович В. Н., Омельяновская Н. М., Пажин Д. М. Полевой датчик Холла на основе структур кремний-на-изоляторе // Нано- и микросистемная техника. 2002. № 10. С. 8–12.
6. Бараночников М. Л., Леонов А. В., Малых А. А., Мордкович В. Н., Мурашев В. Н. Датчики внешних воздействий с частотным выходом на основе полевого МДПДМ-транзистора со встроенным каналом // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 10. С. 8–11.
7. Бараночников М. Л., Леонов А. В., Мокрушин А. Д., Мордкович В. Н., Омельяновская Н. М., Пажин Д. М. Особенности характеристик КНИ полевых датчиков Холла с двухзатворной управляющей системой типа металл-диэлектрик-полупроводник-диэлектрик-металл // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 12. С. 45–48.
8. Silvaco Atlas User's Manual. URL: <http://www.silvaco.com/> (date of access: 30.08. 2016.)
9. Xu Y., Pan H. B., He Sh. Zh., Li L. A Highly Sensitive CMOS Digital Hall Sensor for Low Magnetic Field Applications // Sensors. 2012. Vol. 12. P. 2162–2174.
10. Heidari H., Gatti U., Bonizzoni E., Maloberti F. Low Noise Low Offset Current Mode Hall Sensors // Research in Microelectronics and Electronics (PRIME). 2013. P. 325–328.
11. Huang H., Wang D., Xu Y. A Monolithic CMOS Magnetic Hall Sensor with High Sensitivity and Linearity Characteristics // Sensors. 2015. Vol. 15. P. 27359–27373.
12. Lyu F., Zhang Zh., Toh E., et all. Performance Comparison of Cross-Like Hall Plates with Different Covering Layers // Sensors. 2015. Vol. 15. P. 672–686.

13. Jankovic N., Aleksic S., Pantic D. Simulation and Modeling of Integrated Hall Sensor Devices // Proc. of Small Systems Simulation Symposium. Nis, Serbia. 2012. P. 85–92.
14. Абрамов И. Моделирование элементов интегральных схем: учеб. пособие. Минск: Изд-во БГУ, 1999. 92 с.
15. Нелаев В., Стемпичкий В. Основы САПР в микроэлектронике. Моделирование технологии и прибора. Минск: БГУИР, 2008. 220 с.
16. Xu Y. and Pan H. B. An Improved Equivalent Simulation Model for CMOS Integrated Hall Plates // Sensors. 2011. Vol. 11. P. 6284–6296.
17. Kundert K. The Designer's Guide to Verilog-AMS. Kluwer Academic Publishers: Boston, USA. 2004. 283 p.
18. Rossini A., Borghetti F., Malcovati P. et all. Behavioral model of magnetic sensors for SPICE simulations // Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Electronic, Circuits and Systems (ICECS 2005). 2005. P. 1–4.
19. Новиков С. Г., Гурин Н. Т., Беринцев А. В., Родионов В. А., Штанько А. А., Федоров И. С. Полупроводниковые приборы с S-образной передаточной вольт-амперной характеристики // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 7. С. 52–56.
20. Ницеккер Л. Г. Маршрут разработки библиотеки стандартных элементов // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 10. С. 613–620.

Dao Dinh Ha, Post-Graduate Student, ha.dao.dinh@bsuir.by, **V. R. Stempitsky**, PhD, Associate Professor, vstem@bsuir.by,
Educational establishment "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", Minsk, Belorussia,

Corresponding author:

Stempitsky Viktor R., Associate Professor, Educational establishment "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", Minsk, Belorussia, e-mail: vstem@bsuir.by

Investigation of Hall Sensor Characteristics with Various Geometry of the Active Area

Received on September 12, 2017
Accepted on October 05, 2017

Using device-technological simulation methods, the influence of the active region of the Hall sensor geometrical parameters, manufactured using the standard CMOS process, on its characteristics (sensitivity, Hall voltage, power dissipation and residual voltage) is studied. Approaches to optimizing the structural parameters of the Hall sensor are proposed, as well as a variant for constructing an equivalent circuit for schematic simulation of Hall sensor based devices.

Keywords: Hall sensor, geometric correction factor, magnetosensitive element, sensitivity, device-technological simulation

For citation:

Dao Dinh Ha, Stempitsky V. R. Investigation of Hall Sensor Characteristics with Various Geometry of the Active Area, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 174–186.

DOI: 10.17587/nmst.20.174-186

Introduction

Magnetic field sensors find wide application in the electronic technologies. They are used for measurement of the induction of the magnetic field and contactless determination of the mechanical and electric influences. The magnetic field sensors are applied in the motor industry, mobile and consumer sectors, medicine, space and sea branches, and power engineering as the sensors of chambers and displays, and electronic compasses [1–7].

The most widespread magnetosensitive elements are the sensors, operation of which is based on the Hall effect — occurrence of a cross-section potential difference, when current goes via a conductor, which is in a cross magnetic field. In electronics and various areas the Hall sensors (HS) are used for control of movement, position, speed, direction, current, level and other parameters.

The major problem, which demands an effective solution within the framework of the scientific and applied directions, is improvement of the design parameters of the magnetosensitive sensors, of their operational characteristics, including development of meth-

ods of instrument-technological and circuit simulation, and optimization in the software environment.

The work presents the results of a research of the influence of the geometrical parameters of the active area (forms, L/W ratio, geometrical correction coefficient G , etc.) on the operational characteristics of the Hall sensors. The basic results were received with the use of the corresponding modules of the software complex from Silvaco Company [8].

Design solutions for the Hall sensors and their principle of operation

One of the most significant design parameters of the sensors, irrespective of their purpose, is the geometry of the active area, while for the magnetosensitive sensors the given parameter is crucial. In [3, 4] with the use of a three-dimensional simulation the influence of the geometry, of the form, of the dimensions and of the degree of doping of various areas on HS characteristics, including Hall voltage, sensitivity, residual voltage and temperature coefficient of the residual voltage, was investigated.

In [9] HS is described with the digital interface and sensitivity by current up to $310 \text{ V}/(\text{A} \cdot \text{T})$, consisting of a cruciform plate and signal shaper made with the use of $0.18 \mu\text{m}$ CMOS technology.

In [10] the design and the circuit for signal HS processing working in the mode of current measurement are investigated. For compensation of the residual voltage in HS structure the method of the rotating current is used. Application of a low-noise stabilized operational amplifier ensures a high sensitivity (up to $1660 \text{ V}/(\text{A} \cdot \text{mT})$) and an effective signal processing for the small working currents (not more than $12 \mu\text{A}$).

In [11] an integrated linear Hall sensor is described made by $0.8 \mu\text{m}$ high-voltage CMOS technology, and consisting of a high-sensitivity sensor and signal shaper functioning on the basis of the technology of the dynamic compensation for the residual voltage. A modulator of the rotating current stabilizes the output voltage and improves reliability of the signal shaper.

In [12] the influence is investigated of the concentration of the impurity of *p*-type in the active area, length L , width W and L/W ratio on the characteristics of cruciform HS, namely, on the sensitivity and the residual voltage for various designs. An equivalent circuitry of the instrument ensuring higher accuracy of definition of the residual voltage is presented.

In [13] the results are described of the three-dimensional simulation of the technological process and electric characteristics of a cruciform vertical HS, and also MAGFET (Magnetic Field Effect Transistor), an approach is offered to development of an electric model realized in SPICE language.

Various approaches to realization of the geometry of the active area of the Hall sensor are presented in fig. 1. It is assumed, that the presence of the galvanomagnetic Hall effect determines equivalence (affinity) of the characteristics of the sensor structures functioning on its basis, irrespective of the geometry of the active area. Considering the additional properties and the requirements to the design parameters (applied materials and the space occupied on a plate) and the technological parameters (simplicity of manufacturing, compatibility with the technological processes) of a sensor, in practice, the configurations of the active area, different from the traditional ones, are often applied. At that, it is important to estimate the advantages and disadvantages of each of the proposed solutions.

A plate of a rectangular form (fig. 1, *a*) is a simplified description of the tape design of HS. However, for achievement of a high value of the geometrical correction coefficient, very small contacts $S1 \dots S2$ should be made. The "bridge" design (fig. 1, *b*) is a realization of an infinitely long Hall sensor. Hall voltage is measured between one or another pair of the sensor contacts through the bridge ($S1 - S2$). Two point contacts along the bridge ($S1 - S3$) are used for an accurate measurement of a voltage drop along the sample. Four-contact designs

(fig. 1, *c-f*) ensure a high correction coefficient G , which has a major influence on the Hall voltage.

Fig. 2 presents the dependence of the correction geometrical coefficient on L/W ratio for various values of the Hall angle θ_X , calculated under the following formula:

$$G = 1 - \frac{16}{\pi^2} e^{-\frac{\pi L}{2W}} \left(1 - \frac{8}{9} e^{-\frac{\pi L}{2W}} \right) \left(1 - \frac{\theta_X^2}{3} \right).$$

Analysis of the dependence (fig. 2) demonstrated that for $0 < L/W < 3$, the geometrical correction coefficient has the maximal value of 0.96 corresponding to the ratio $L/W = 3$. For $3 < L/W < 5$ the maximal G equal to 0.99 is reached at the maximal ratio of $L/W = 5$. It is necessary to point out, that at $3 < L/W < 5$ the top limit of G begins to increase quickly from 0.96 up to 0.99. Thus, a correction for the final length of the sensor is rather small, therefore, there is no sense in increasing this ratio. In practice, usually, the value of L/W is assumed from 2 up to 3.

One of the drawbacks of HS is the presence of the residual voltage, which appears in the absence of a magnetic field at the supply voltage turned on and is connected with imperfection and deviations of the technological manufacturing process and heterogeneity of the physical properties of the material of the active area. Methods for accounting and minimization of the residual voltage are described in detail in [1, 2]. The residual voltage depends on the manufacturing technology, temperature and mechanical stress. The given characteristic limits the minimal measured magnetic field.

The standard design of a Hall sensor is the so-called Greek cross, which is formed symmetrically and is invariant in relation to rotation by angle of 90° . It allows us to use the method of the rotating current for minimization of the residual voltage. The traditional way of reduction of the residual voltage consists in connection of two or four identical rotating HS [3]. In [4] the circuits are analyzed made by CMOS technology and based on the method of the rotating current (periodic rearrangements of the supply and output contacts) for increasing of the sensitivity of a sensor.

The investigated designs and modelling technique

The design of the Hall sensor investigated in the work is generated on a silicon substrate of *p*-type (concentration of boron of 10^{15} cm^{-3}) with thickness of $5.0 \mu\text{m}$ with the active area of *n*-type and thickness of $1.0 \mu\text{m}$, alloyed by arsenic with concentration of 10^{17} cm^{-3} .

The geometrical and electrophysical parameters for HS structures considered in the work are presented in table 1. The width of the contacts is $0.7 \mu\text{m}$, the distance from the contacts to *n*-type border is $0.35 \mu\text{m}$ for the cruciform samples and $3.5 \mu\text{m}$ for the rectangular ones. The position of the contacts in relation to the borders

is important for the analysis of the residual voltage, because the contour errors can lead to its increase.

The processes of transfer of the charge carriers are described by a fundamental system of equations and diffusion-drift models, which include the equations of continuity for the electrons and holes, and the Poisson equation under the influence of the electric and magnetic fields [3, 14, 15]. The account of the magnetic field, influencing the active area of the instrument structure of HS and leading to occurrence of the Hall voltage, was carried out on the basis of the model of the galvanic transfer.

Adequate results of simulation can be received due to correctly set mathematical models for description of the processes occurring in the structure of the semiconductor devices: mobility models, recombinations, and statistics of the charge carriers. For description of the statistics of the charge carriers the Boltzmann model in Silvaco complex was used, for the account of the dependence of the mobility of the charge carriers on the concentration — the model of impact ionization of Concannon, and for description of the recombination processes — the model of Schottky—Reed—Hall [15].

Results and their discussion

For research of the operational characteristics and search for the optimal design solutions of HS a series of calculations were done for the instrumental-technological simulation of the technological manufacturing process, electric and other characteristics of the instrument structure with the geometrical configurations of the active area (table 1).

Research of the basic characteristics of HS. Fig. 3 presents the volt-ampere characteristics (VAC) of the Hall sensor for the investigated designs of the active area, received for the value of induction of the magnetic field $V = 0.5$ T. Nonlinearity of HS is explained by three mechanisms: nonlinearity of the characteristics of a material, geometrical nonlinearity and nonlinearity of the field effect of the p - n -junction. Nonlinearity of the characteristics of the material of the active area and the geometrical nonlinearity have a square-law dependence on the value of induction of the magnetic field and in case of integration of the Hall sensors can compensate for each other.

Dependences of the Hall voltage of V_X on the supply current I at magnetic field induction $V = 0.5$ T (fig. 4). It is necessary to point out, that cruciform designs have identical L/W ratios, and differ only in the scaling ratio.

Table 2 presents the values of Hall voltage V_X of the investigated designs for $V = 0.5$ T. It is demonstrated that the maximal Hall voltage is ensured for design 5 with a low level of doping of the active area $V_X = 165.0$ mV.

Fig. 5—7 present dependencies of the sensitivity of HS on the supply current I at induction of the magnetic field of $V = 0.5$ T. It is shown, that the sensitivity by current increases with the growth of the supply current, while the sensitivity by voltage decreases. The latter mechanism is explained by the fact that S_V can be pre-

sented as the relation of the sensitivity by current to the input resistance R , and denominator R increases faster, than S with the growth of the supply current. The greatest values of the absolute sensitivity $S = 140$ mV/T and the sensitivity by current $S_I = 280$ V/(A · T) are typical for a design with a low concentration of the impurities of $5.0 \cdot 10^{16}$ cm⁻³; at that, a rectangular design has a better sensitivity by voltage $S_V = 0.048$ V/(V · T). It is necessary to point out that the results of simulation of the Hall voltage and HS sensitivity agree well with the experimental data [3].

Analysis of the power consumption. The process of selection of the optimal design for HS is based on the analysis of behavior of several characteristics, such as sensitivity, residual voltage and dissipated power. In order to reduce the residual voltage the method of a rotating current is applied, and in order to ensure high sensitivity, the concentration of the charge carriers in the active area is reduced [1, 2, 8, 9]. Thus, the major condition for optimization is provision of the maximal sensitivity of HS at the minimal values of the residual voltage and the dissipated power.

Variation of the sensitivity by power S_P depending on the dissipated power P is presented in table 3.

It was established, that the cruciform designs have the greatest sensitivity by power, however, for the given concrete advantage the geometry is of a smaller value. It would be simple to assume, that the lowest dissipated power is ensured at a low current, however, in this case the signal-to-noise ratio is too low.

Analysis of the residual voltage. The residual voltage is a parasitic effect which brings a contribution to the general Hall voltage, reducing the sensitivity of the sensor. The residual voltage was measured in the absence of the magnetic field ($V = 0$). It appears owing to imperfection of manufacturing, asymmetry (misalignment) of the contacts, heterogeneity of the specific resistance and thickness of a material, and also mechanical stresses in a combination with the effect of piezoresistance. An analysis of the residual voltage allows us to estimate the influence of the degree of misalignment of the contacts on the residual voltage of HS, which ensures a possibility for determination of a geometrical configuration of HS of the least value.

Fig. 8 shows, how the asymmetry for the cruciform Hall sensors was introduced, first of all on the bias contact of $l = 0.7$ μ m.

Further, the results of the research of the residual voltage caused by the asymmetry of the bias (a and c) and sensitive (b and d) HS contacts are presented.

Fig. 9 presents the dependences of the residual voltage V_{off} on the supply current I . It was established that for design 1 the misalignment of the contacts had the least influence on the residual voltage, which was 2.8 μ V. An increase of the sizes of a design allows us to reduce the errors on the borders and, hence, to minimize the residual voltage. Fig. 10 presents the dependences of the residual magnetic field B_{off} on tempera-

ture T . The design 5 with its low concentration in the active area has the lowest value of the residual magnetic field $B_{off} = 0.19$ mT and $B_{off} = 0.38$ mT at $T = 248$ K and $T = 398$ K [3–4].

An equivalent circuit for realization of the HS electric model

For practical applications the sensitive element (Hall sensor) is usually placed with the circuit for signal processing on one crystal. However, a realization of such a system in a design remains a problem, because the models of the sensors are not included in the library of designing, provided by the manufacturer of the chip. The standard models for description of the electric characteristics of HS are too complicated [13] or idealized [18–20]. For integration with the programs of circuit simulation the 2D or 3D physical models described by FEM simulators demand considerable computing costs [13], but they are useful for an analysis of the influence of the geometrical parameters on the behavior of a sensor.

In order to increase the efficiency of designing and productivity of the system it is necessary to have an electric (SPICE) model adequately describing the characteristics of a sensitive element. Such a model describes the behavior of the sensor with the use of a set of equations received by means of adequate assumptions and simplifications.

Fig. 11 presents an equivalent circuit for description of the electric model of HS. For an ideal design (absence of a technological mismatch and mechanical stress in the system) during measurement of the surface resistance of layer R_S the method of van der Pauw is used. Since the device is symmetric, it is necessary to determine the values of the two resistances between the contacts: R_D for the resistance between the two opposite ones and R_H — between the two neighboring contacts [16]. In comparison with the existing solutions [2] the circuit ensures taking into account a possibility of the galvanomagnetic and temperature effects.

The proposed equivalent circuit has four electric outlets and one external source as an input (B) and includes the following components: eight nonlinear resistors for description of the dependences of HS characteristics on the magnetic field and temperature; four sources of voltage, controlled by current (current controlled voltage source — CCVS), which allow us to estimate contributions to the Hall voltage of the currents proceeding through the nonlinear resistance; and four interface units for simulation of the consecutive resistances.

For a practical realization of the electric (compact) model of the sensor, Verilog-A language, describing the analogue equipment, can be used [17].

Conclusion

- Within the framework of the device-technological simulation the influence of the geometrical parameters of the active area of the Hall sensor on its operational characteristics was investigated.

- It was demonstrated, that for the ratio of length L to width W active area from 0 up to 3 the geometrical correction coefficient had the maximum value of 0.96 at $L/W = 3$; for the ratio from 3 up to 5 the maximal G was 0.99 at $L/W = 5$.
- It was established, that the sensitivity by current increased with the growth of the supply current and the sensitivity by voltage decreased. The greatest values of the absolute sensitivity $S = 140$ mV/T and of the sensitivity by current $S_I = 280$ V/(A · T) were characteristic for a design with a low concentration of impurities of $5.0 \cdot 10^{16}$ cm⁻³, at that, a rectangular design had the best sensitivity by voltage $S_V = 0.048$ V/(V · T).
- It was demonstrated that the lowest dissipated power was ensured at a low current, but, at that, the value of the signal to noise ratio was too low.
- It was established, that for a cruciform design the influence of the misalignment of the contacts on the residual voltage had the least value, which was equal to 2.8 mcV. An increase of the geometrical sizes of HS allowed us to reduce the errors on the borders and to minimize the residual voltage. A design with a low concentration in the active area had the lowest values of the residual magnetic field of 0.19 and 0.38 mT, accordingly, at temperatures of 248 and 398 K.
- A version of a design of an equivalent circuit for simulation of the circuit solutions on the basis of the Hall sensor was proposed.

References

- Popovic R. S.** *Hall Effect Devices*. Institute of Physics Publishing: Bristol, UK. 2004. Second Edition. 420 p.
- Ramsden E.** *Hall Effect Sensors — Theory and Applications*, Elsevier: Burlington, MA, USA. 2006. 2nd ed. 272 p.
- Paun M. A., Salles J. M., Kayal M.** Comparative Study on the Performance of Five Different Hall Effect Devices, *Sensors*. 2013, vol. 13, pp. 2093–2112.
- Paun M. A., Salles J. M., Kayal M.** Hall Effect Sensors Design, Integration and Behavior Analysis, *J. Sens. Actuator Netw.*, 2013, vol. 2, pp. 85–97.
- Baranochnikov M. L., Leonov A. V., Mal'tsev P. P., Mokrushin A. D., Mordkovich B. N., Omel'yanovskaya N. M., Pazhin D. M.** Polevoy datchik Kholla na osnove struktur kremniy-na-izolyatore, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2002, no. 10, pp. 8–12.
- Bapanochnikov M. L., Leonov A. V., Malykh A. A., Mopdkovich V. N., Mupashev V. N.** Datchiki vnesnih vozdeystviy s chastotnym vykhodom na osnove polevogo MDPDM-tranzistora so vstroyennym kanalom, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 10, pp. 8–11.
- Bapanochnikov M. L., Leonov A. V., Mokpushin A. D., Mopdkovich V. N., Omel'yanovskaya N. M., Pazhin D. M.** Osobennosti khapaktepistik KNI polevykh datchikov Kholla s dvukhzatvornoj upravlyayushchey sistemoy tipa metall-dielektrik-oluprovodnik- dielektrik-metall, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2008, no. 12, pp. 45–48.
- Silvaco** Atlas User's Manual. URL: <http://www.silvaco.com/> (date of access: 30.08. 2016.)
- Xu Y., Pan H. B., He Sh. Zh., Li L.** A Highly Sensitive CMOS Digital Hall Sensor for Low Magnetic Field Applications, *Sensors*, 2012, vol. 12, pp. 2162–2174.

10. Heidari H., Gatti U., Bonizzoni E., Maloberti F. Low Noise Low Offset Current Mode Hall Sensors, *Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*, 2013, pp. 325–328.
11. Huang H., Wang D., Xu Y. A Monolithic CMOS Magnetic Hall Sensor with High Sensitivity and Linearity Characteristics, *Sensors*, 2015, vol. 15, pp. 27359–27373.
12. Lyu F., Zhang Zh., Toh E. et all. Performance Comparison of Cross-Like Hall Plates with Different Covering Layers, *Sensors*, 2015, vol. 15, pp. 672–686.
13. Jankovic N., Aleksic S., Pantic D. Simulation and Modeling of Integrated Hall Sensor Devices, *Proc. of Small Systems Simulation Symposium*. Nis, Serbia, 2012, pp. 85–92.
14. Abramov I. *Modelirovaniye elementov integral'nykh skhem: ucheb. posobiye*, Minsk: Izd-vo BGU, 1999. 92 p. (in Russian).
15. Nelayev V., Stempitsky V. *Osnovy SAPR v mikroelektronike. Modelirovaniye tekhnologii i pribora*, Minsk: BGUIR, 2008. 220 p.
16. Xu Y. and Pan H. B. An Improved Equivalent Simulation Model for CMOS Integrated Hall Plates, *Sensors*, 2011, vol. 11, pp. 6284–6296.
17. Kundert K. *The Designer's Guide to Verilog-AMS*, Kluwert Academic Publishers: Boston, USA. 2004. 283 p.
18. Rossini A., Borghetti F., Malcovati P. et all. Behavioral model of magnetic sensors for SPICE simulations, *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Electronic, Circuits and Systems (ICECS 2005)*, 2005, pp. 1–4.
19. Novikov S. G., Gurin N. T., Berintsev A. V., Rodionov V. A., Shtan'ko A. A., Fedorov I. S. Poluprovodnikovyye pribory s S-obraznoy peredatochnoy vol't-ampernoy kharakteristiki, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2014, no. 7, pp. 52–56 (in Russian).
20. Nidekker L. G. Marshrut razrabotki biblioteki standartnykh elementov, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 10, pp. 613–620.

УДК 621.38.049.77

DOI: 10.17587/nmst.20.186-192

Камран Кешаварздикиолаи¹, аспирант, e-mail: kamran-keshavarz@yandex.ru,
В. Ф. Лукичев^{1, 2}, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, и.о. директора, **В. А. Кальнов²**, канд. техн. наук, доц., **Е. Ф. Певцов¹**, канд. техн. наук, доц.,
¹ Московский технологический университет (Московский институт радиотехники, электроники и автоматики)
² Физико-технологический институт РАН

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АИН И ЦТС, ПРИМЕНЯЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ РЕЗОНАТОРА В ВИБРАЦИОННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ГИРОСКОПАХ

Поступила в редакцию 22.09.2017

Целью данной работы является гармонический анализ нитрида алюминия (AlN) и цирконата-титаната свинца (ЦТС) для применения в резонаторах микромеханических вибрационных кольцевых гироскопов (ВКГ). На основе конечно-элементного анализа показана амплитудно-частотная характеристика двух образцов. Приведен принцип работы пьезоэлектрического привода ВКГ.

Ключевые слова: AlN, ЦТС, моделирование, вибрационный кольцевой гироскоп

Введение

В настоящей работе на основе развития микромеханических гироскопов (ММГ) продолжается ряд исследований по моделированию смещений кольцевых резонаторов под действием переменного электрического напряжения [1–4]. В большинстве известных схем ММГ реализация режима движения (РД) и режима чувствительности (РЧ) осуществляется с помощью электростатических преобразователей, однако для создания достаточных сил и амплитуд смещений необходимы узкие зазоры и значительное постоянное напряжение срабатывания. Пьезоэлектрический привод — это весьма привлекательная альтернатива, потому что электромеханическая связь сильнее и не требует постоянного напряжения срабатывания или узких зазоров. Основными достоинствами пьезоэлектрических материалов в конструкции резонаторов

вибрационных кольцевых гироскопов (ВКГ) являются: быстродействие, низкий уровень шума, малый дрейф параметров, высокая точность, низкое энергопотребление, высокая надежность и длительный срок службы. Наиболее часто в качестве пьезоэлектрических материалов в конструкции ВКГ используют цирконат-титанат свинца (ЦТС), модифицированный различными компонентами, и нитрид алюминия (AlN).

Цель настоящей статьи заключается в постановке и исследовании частотных характеристик AlN и ЦТС для применения в ВКГ методом конечных элементов. Следует отметить, что основным преимуществом резонатора ВКГ по сравнению с традиционными прямоугольными резонаторами является более высокая точность, достигаемая в процессе производства. Кроме того, вследствие своей симметрии удары и вибрации на них сильно не влия-

ют. Необходимо особо отметить, что монолитная конструкция таких резонаторов устраниет любые неблагоприятные последствия склеивания и обеспечивает более простой и повторяемый способ изготовления вибрационных гироскопов [5]. Стоит отметить, что прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты могут одновременно комбинироваться в вибрационных гироскопах и использоваться как в РД, так и в РЧ [6]. Несмотря на огромное число публикаций о пьезоэлектрических вибрационных гироскопах, проблемы миниатюризации, повышения чувствительности и надежности еще остаются открытыми. Вопрос, имеющий большое практическое значение, касается адекватного и точного моделирования пьезоэлектрических гироскопов.

Принцип работы

Чувствительный элемент рассматриваемого ВКГ подразделяется на два вида: к первому относятся кольцевой резонатор, выполненный из AlN и ЦТС, диаметром 5 мм и сечением 100×100 мкм; второй вид чувствительного элемента ВКГ содержит кольцевой резонатор с подложкой Si(100) диаметром 5 мм и сечением так же 100×100 мкм для подложки и 100×1 мкм для пьезоэлектрического материала (рис. 1). Цель использования подложки состоит в том, чтобы узнать, насколько пьезоэлектрический эффект способен сдвинуть конструкцию резонатора. При приложении переменного электрического напряжения к пьезоэлектрическому материалу в кольцевом резонаторе возбуждаются колебания, имеющие форму стоячей волны, пучности которой находятся в районах A, B, C и D (рис. 1, a). Представленный тип резонатора работает на основе обратного пьезоэлектрического эффекта в РД, и его смещение достигается при приложении электрического напряжения в РЧ. Прецессия стоячей волны во вращающемся резонаторе поясняется на рис. 2. Кольцевой чувствительный элемент колеблется вдоль осей X и Y (т.е. первичное смещение кольца x_1). В этом случае без вращения чувствительного элемента первичное колебание имеет четыре узла, где смещение кольца равно нулю. Эти узлы расположены под углом 45° по осям X и Y. При вращении резонатора вокруг оси Z (ось чувствительности), которая перпендикулярна плоскости кольца, первичное колебание благодаря эффекту Кориолиса вызывает прецессию стоячей волны относительно резонатора. Амплитуда вторичных колебаний кольца пропорциональна измеряемой угловой скорости Ω и определяется выражением [7]

$$\delta_2 = 4K \frac{Q}{\omega_0} \delta_1 \Omega, \quad (1)$$

где $K \approx 0,37$ — масштабный коэффициент резонатора; Q — добротность резонатора; ω — собствен-

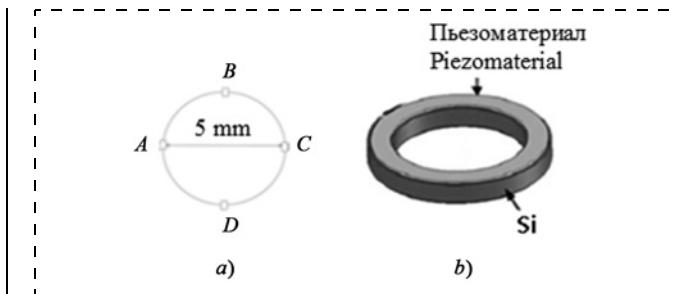


Рис. 1. Чувствительный элемент ВКГ: а — общий вид; б — резонатор с подложкой

Fig. 1. Sensitive element of VRG: a — general view; b — resonator with the substrate

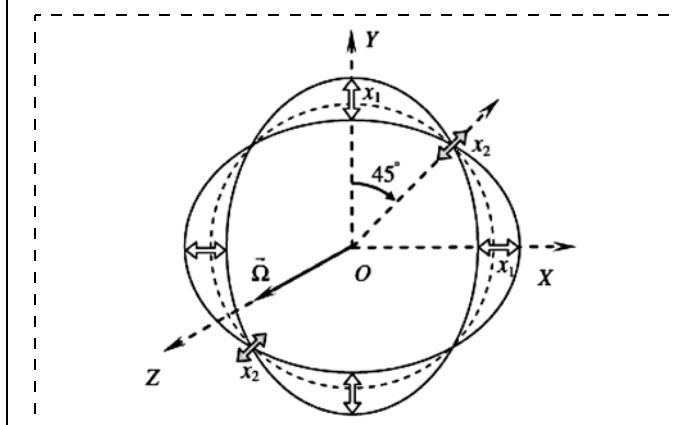


Рис. 2. Прецессия стоячей волны вибрирующего резонатора

Fig. 2. Precession of a standing wave of the vibrating resonator

ная частота колебаний резонатора; δ_1 — амплитуда первичных колебаний; Ω — угловая скорость.

В результате вторичные колебания (x_2) будут появляться в узлах и позволят измерять внешнюю угловую скорость Ω . Несмотря на то что в резонаторе не существует сосредоточенных масс, с точки зрения первичного и вторичного смещений x_1 и x_2 уравнения движения записываются в следующем виде [8]:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + 2\zeta\omega\dot{x}_1 + (\omega^2 - \Omega^2)x_1 = q_1 - 2c\Omega\dot{x}_2 - c\dot{\Omega}x_2; \\ \ddot{x}_2 + 2\zeta\omega\dot{x}_2 + (\omega^2 - \Omega^2)x_2 = q_2 + 2c\Omega\dot{x}_1 + c\dot{\Omega}x_1, \end{cases} \quad (2)$$

где ζ — безразмерный коэффициент затухания (демпфирования) материала резонатора; c — коэффициент связи гироскопа (коэффициент Брайана); q_1 и q_2 — эффективные ускорения под действием внешних сил вдоль первичных и вторичных смещений. При совпадении первичного и вторичного колебаний возникает максимальная чувствительность. Поэтому благодаря симметричности структуры и равным первичным и вторичным колебаниям резонаторы в форме кольца являются перспективными конфигурациями.

Соотношения между деформацией, механическим напряжением, электрическим смещением и

Таблица 1
Table 1

Матрица жесткости, диэлектрическая проницаемость и пьезоэлектрическая постоянная AlN и ЦТС
The stiffness, dielectric permittivity and piezoelectric coefficient matrix of the AlN and PZT

Материал Material	$[c_{ij}^e]$ Тензор постоянной упругости, ГПа Elastic stiffness tensor, GPa	$[\varepsilon_{ij}^s]$ Тензор диэлектрической проницаемости, Ф/м Dielectric permittivity tensor, F/m	$[e_{ij}]$ Пьезоэлектрический коэффициент, Кл/м ² Piezoelectric coefficient, c/m ²
AlN	$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{12} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{11}-c_{22}}{2} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{32} \\ 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & e_{24} & 0 \\ e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
PZT	$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{12} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{11}-c_{22}}{2} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

напряженностью электрического поля в пьезоэлектрических материалах определяются следующими выражениями [9]:

$$S_\alpha = s_{\alpha\beta}^E T_\beta + d_{i\alpha} E_i; \quad (3)$$

$$D_i = d_{i\alpha} T_\alpha + \varepsilon_{ij}^T E_j; \quad (4)$$

$\alpha, \beta = 1, 2, \dots, 6, \quad i, j = 1, 2, 3,$

где S_α — деформация; s — тензор коэффициентов податливости; T_β — механическое напряжение; $d_{i\alpha}$ — тензор пьезоэлектрических постоянных; E — напряженность электрического поля; D — электрическое смещение; ε — тензор диэлектрических констант; T — знак транспонированной матрицы. Матрица жесткости, тензор диэлектрической проницаемости и пьезоэлектрических постоянных AlN [10] и ЦТС [11] представлены в табл. 1. В табл. 2 сравниваются основные свойства AlN и ЦТС [12].

Постановка задачи

Ставится задача: провести гармонический анализ резонатора ВКГ с пьезоэлектрическим приводом на основе конечно-элементной модели с использованием интегрированного программного пакета CoventorWare®, версия-2012. Наиболее важная часть пьезоэлектрического моделирования в этом программном пакете — выбор свойств материалов. В табл. 3 представлены материалы и их свойства, использованные при проектировании ВКГ. После выбора свойства материалов процесс изготовления начинается с проектирования двумерной модели.

Программный пакет "Coventor's Designer", объединяющий физические модели различных устройств, позволяет на основе 2D-схемы автоматически создавать трехмерные структуры. Боковая поверхность AlN и ЦТС используется для возбуждения и детектирования соответственно механического и электрического сигналов. Конструкция резонатора в САПР CoventorWare® основана на технологии

Таблица 2
Table 2

Основные параметры AlN и ЦТС
The basic parameters of AlN and PZT

Параметры Parameters	AlN	ЦТС PZT
Пьезомодуль d_{33} d_{33} constant	Маленький Low	Большой High
Пьезомодуль d_{31} d_{31} constant	Маленький Low	Большой High
Плотность Density	Легкая Light	Тяжелая Heavy
Диэлектрическая постоянная Dielectric constant	Низкая Low	Огромная Huge
Пределная частота ГГц GHz capability	Хорошая Good	Плохая Poor
Скорость распространения звука Sound velocity	Быстрая High	Медленная Slow
Акустическая потеря Acoustic losses	Маленькая Low	Большая High
Электрическое сопротивление Electrical resistance	Большое High	Большое High
Совместимость с КМОП- технологией CMOS compatibility	Полная Fully	Нет Not
Радиочастотная потеря RF losses	Маленькая Low	Большая High
Сегнетоэлектричество Ferroelectricity	Нет No	Да Yes

комплементарный металл-оксид-полупроводник (КМОП) и поверхностной МЭМС-технологии. Поэтому на следующем этапе для получения соответствующих проектных решений применяется инструмент "Process Editor®". После определения областей и граней всей структуры задается сетка для выполнения последующих операций моделирования. Сетка "Extruded bricks" имеет форму четырехгранных плоскопараллельных объемных фигур с изменяемой формой поверхности.

Другими словами, модель разбивается на элементы в виде кирпичей, причем их боковые грани меняют свою форму в соответствии с формой поверхности, а построение сетки идет от поверхности вглубь объема модели. Данного типа сетки наилучшим образом подходит для тел, имеющих кольцевую конфигурацию. По осям X , Y значение сетки выбирается 50, 40, 30, 20 мкм и по оси Z — 100 мкм (рис. 3).

Результаты максимального смещения кольца под действием постоянного электрического напряжения -5 и $+5$ В в точках A и C (рис. 3) при выборе

Таблица 3
Table 3

Параметры и константы, используемые для моделирования
The parameters and constants used for modeling

Материал <i>Material</i>	Постоянная упругости, ГПа <i>Elastic stiffness, GPa</i>	Плотность, г/м ³ <i>Density, g/m³</i>	Дизелектрическая постоянная $\times 10^{-11}$, Ф/м <i>Dielectric permittivity $\times 10^{-11}, F/m$</i>	Пьезоэлектрический коэффициент, Кл/м ² <i>Piezoelectric coefficient, C/m²</i>
Si(100)	$E = 30$	2,3	12	0
AlN	$C_{11} = C_{22} = 345$ $C_{33} = 395$ $C_{12} = 125$ $C_{13} = C_{23} = 120$ $C_{44} = C_{55} = 118$ $C_{66} = 110$	3,255	$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = 8$ $\varepsilon_{33} = 9,5$	$e_{31} = -0,58$ $e_{33} = 1,58$ $e_{15} = -0,48$
ЦТС <i>PZT</i>	$C_{11} = 126$ $C_{12} = 79$ $C_{13} = 84$ $C_{33} = 117$ $C_{44} = C_{66} = 23$	7,55	$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = 1700$ $\varepsilon_{33} = 1470$	$e_{31} = -2,7$ $e_{33} = 5,9$ $e_{15} = 7,84$

Таблица 4
Table 4

Максимальное смещение образцов с разными сетками
Maximum displacement of samples with the different meshes

Материал <i>Material</i>	Резонатор без подложки <i>Resonator without substrate</i>			
	Сетка 50 mesh 50	Сетка 40 mesh 40	Сетка 30 mesh 30	Сетка 20 mesh 20
AlN ЦТС (PZT)	22 pm 6 nm	7 pm 1,9 nm	11 pm 9,9 nm	67 pm 4,9 nm
Резонатор с Si-подложкой <i>Resonator with Si-substrate</i>				
AlN ЦТС (PZT)	0,18 pm 2,03 pm	0,24 pm 6,2 pm	0,73 pm 7,3 pm	0,53 pm 4,35 pm

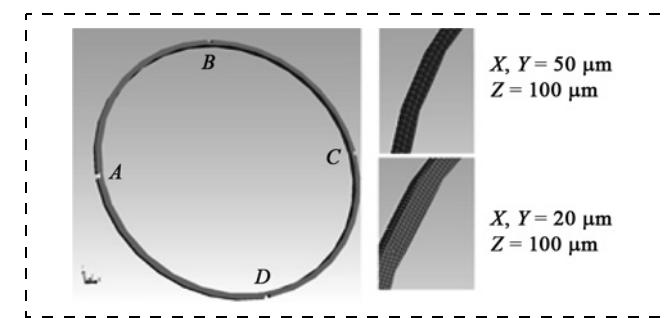


Рис. 3. Конечно-элементная модель резонатора ВКГ с сеткой "Extruded bricks"
Fig. 3. Finite element model of the VRG resonator with "Extruded Bricks" mesh

разных сеток представлены в табл. 4. Следует подчеркнуть, что более мелкие сетки мало влияют на результаты моделирования.

Модуль "Analyzer™" является основной интегрированной средой моделирования, которая включает различные вычислительные программы, описывающие электрические, механические и другие свойства. В этом модуле задаются предельные и начальные условия, настраивается программа расчетов, а также выполняются расчеты и получаются результаты. Для получения частотных значений и смещения резонатора ВКГ анализ выполнялся с помощью пьезоэлектрического инструмента. Для создания однородного электрического поля пьезоэлектрический привод индуцируется путем приложения переменного электрического напряжения между областями A и C (рис. 3). Сначала прикладывается 10 В, а потом с шагом 20 В напряжение увеличивается до 70 В. Получившийся результат для четырех образцов показан на рис. 4 (см. четвертую сторону обложки). Сравнение частотных характеристик (рис. 4, a, и рис. 4, b) показывает, что при применении ЦТС смещение резонатора почти на три порядка (от нанометрового до микрометрового диапазона) увеличивается.

Заключение

С помощью программного пакета CoventorWare® были моделированы резонаторы ВКГ с пьезоэлектрическим приводом. Исходя из полученных результатов частотного анализа и конечно-элементного моделирования, можно считать, что ЦТС является целесообразным и подходящим пьезоэлектрическим материалом резонатора ВКГ. Сравнение AlN и ЦТС показывает очевидные преимущества ЦТС и, таким образом, ЦТС позволяет несколько расширить диапазон смещений кольцевого гироскопа.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки (государственное задание, код проекта 8.5098.2017/БЧ) и Президиума РАН (раздел "Фундаментальные исследования").

Список литературы

1. Тимошенков С. П., Плеханов В. Е., Тимошенков А. С. Разработка математического описания кольцевого микрогоскопа // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 5. С. 18–25.
2. Тимошенков С. П., Плеханов В. Е., Анчутин С. А., Зарянкин Н. М., Рубчик В. Г., Дернов И. С., Шилов В. Ф., Кочуринова Е. С. Балансировка резонатора кольцевого микромеханического гироскопа // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 11. С. 37–44.
3. Анчутин С. А., Плеханов В. Е. Применение метода элементов для анализа параметров кольцевого резонатора микромеханического твердотельного волнового гироскопа // Авиакосмическое приборостроение. 2007. № 6. С. 25–29.
4. Ahmed M. El-Sayed, Maged Ghoneima, Mohamed A. E. Mahmoud. Modeling of nonlinearities in vibratory ring gyroscope // 2013 Japan-Egypt International Conference on Electronics, Communications and Computers (JEC-ECC). Egypt. IEEE 2013. P. 52–57.
5. Pavel S. Marinushkin. Dynamic analysis of tubular piezoelectric gyroscope // 2010 International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Novosibirsk. IEEE 2010. P. 168–171.
6. Sushma Kotru, Alton Highsmith, Jian Zhong, Veronica Rincon, John E. Jackson, Paul Ashley. Feasibility study of mi-
- cromachined single-axis vibratory gyroscope using piezoelectric PNZT thin films for actuation and sensing // Smart Materials and Structures. 2010. Vol. 19, N. 8. P. 1–12.
7. Матвеев В. В., Распов В. Я. Основы построения бесплatformенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2009. 280 с.
8. Vladislav Apostolyuk. Coriolis vibratory gyroscope — theory and design, Kiev: Springer, 2016.
9. Маринушкин П. С. Разработка и исследование датчиков угловой скорости с улучшенными метрологическими характеристиками для приборов контроля параметров движения и деформации объектов. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Красноярск, ФГАО ВПО СУФ, 2014. 121 с.
10. Vigevani G. MEMS Aluminum Nitride Technology for Inertial Sensors. PhD dissertation. Berkely University of California, California, 2011.
11. Yi Tao, Xuezhong Wu, Dingbang Xiao, et al. Design, analysis and experiment of a novel ring vibratory gyroscope // Sensors and Actuators A. 2011. Vol. 168. P. 286–299.
12. Mahmud Al Ahman, Robert Plana. Piezoelectric coefficient of thin film aluminum nitride characterizations using capacitance measurements // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2009. Vol. 19, N. 10. P. 140–142.

Kamran Keshavarzdivkolae¹, Postgraduate Student, kamran-keshavarz@yandex.ru,
V. F. Lukichev^{1, 2}, Professor, Corresponding member of RAS, D. Sc., Director,
V. A. Kalnov², Ph. D., Associate Professor, **E. F. Pevtsov**¹, Ph. D., Associate Professor,
¹ Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454, Russian Federation
² Physical-Technological Institute of RAS

Corresponding author:

Kamran Keshavarzdivkolae, Postgraduate Student, Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: kamran-keshavarz@yandex.ru

Comparative Estimation of AlN and PZT Frequency Response Used as a Resonator in the Vibrating Ring Gyroscopes

Received on September 11, 2017

Accepted on October 25, 2017

The aim of this research is a harmonic analysis of the aluminum nitride (AlN) and lead zirconate titanate (PZT) for the resonator applications in the micromechanical vibrating ring gyroscopes (MVRG). Based on the finite element method, it demonstrates the frequency response of two samples and presents the operating principles of the MVRG piezoelectric actuation.

Keywords: AlN, PZT, Simulation, vibrating ring gyroscope

For citation:

Keshavarzdivkolae K., Lukichev V. F., Kalnov V. A., Pevtsov E. Ph. Comparative Estimation of AlN and PZT Frequency Response Used as a Resonator in the Vibrating Ring Gyroscopes, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 186–192.

DOI: 10.17587/nmst.20.186-192

Introduction

The present work based on the development of micromechanical gyroscope (MMG), continues a series studies on displacement simulations of the ring resonators under alternating electric voltage [1–4]. In most MMG circuits, the drive mode (DM) and sense mode (SM) are realized by electrostatic transducers however, creation of the sufficient forces and displacement am-

plitude require narrow gaps and considerable triggering voltage. A piezoelectric actuation is a rather attractive alternative, because the electromechanical coupling is stronger and does not require continuous triggering voltage or narrow gaps. The basic advantages of the piezoelectric materials in the vibrating ring gyroscopes (VRG) resonator structures are high speed, low noise level, small drift of parameters, high accuracy, low en-

ergy consumption, high reliability and long service life. The most often used piezoelectric materials in the VRG constructions are lead zirconate titanate (PZT), modified by various components and aluminum nitride (AlN).

The aim of the article is presentation and research of the frequency characteristics of AlN and PZT for application in VRG by finite elements method. It is necessary to point out, that the basic advantage of VRG resonator in comparison with the traditional rectangular resonators is a higher accuracy achieved in the manufacturing process. Moreover, because of its symmetry, the shocks and vibrations do not have a strong influence on it. It should be emphasized that, monolithic design of the resonators eliminates any adverse consequences of pasting and ensures a simpler and repeatable way of manufacturing of the vibrating gyroscopes [5]. We should also point out, that the direct and reverse piezoelectric effects can simultaneously be combined in the vibrating gyroscopes and be used both in DM and in SM [6]. Despite the huge number of publications about the piezoelectric vibrating gyroscopes, the problems of miniaturization, sensitivity and higher reliability still remain unsolved. A question which has great practical value is the adequate and accurate modeling of the piezoelectric gyroscopes.

Principle of Operation

The sensitive element of the considered VRG can be divided into two types: the first is the ring resonator made from AlN and PZT, with 5 mm diameter and section of $100 \times 100 \mu\text{m}$. The second one is the ring resonator with the Si (100) substrate, 5 mm diameter and section of $100 \times 100 \mu\text{m}$ of the substrate of $100 \times 1 \mu\text{m}$ of the piezoelectric material (fig. 1). The purpose of using substrate is to find out, how the piezoelectric effect can shift the resonator structure. When alternating electric voltage is applied to the piezoelectric material, oscillations will be excited in the ring resonator in the standing wave form, the antinodes of which are in areas *A*, *B*, *C* and *D* (fig. 1, *a*). The presented type of the resonator works based on reverse piezoelectric effect in DM and its displacement is reached, when electric voltage is applied in SM. The precession of the standing wave in the rotating resonator is explained in fig. 2. The ring sensitive element oscillates along *X* and *Y* axes (i. e. primary displacement of the ring x_1). In this case without a rotation of the sensitive element the primary oscillation has four nodes, where the ring displacement is equal to zero. These nodes are located at the 45° angle along *X* and *Y* axes. During resonator rotation along *Z* axis (sensitive axis), which is perpendicular to the planes of the ring, the primary oscillation, due to the Coriolis effect, makes a precession of the standing wave in relation to the resonator. The amplitude of the secondary oscillation of the ring is proportional to the mea-

ured velocity of rotation Ω and is defined by the following expression [7]:

$$\delta_2 = 4K \frac{Q}{\omega_0} \delta_1 \Omega, \quad (1)$$

where $K \approx 0.37$ — scale coefficient of the resonator; Q — quality factor of the resonator; ω — natural frequency of the oscillations in the resonator; δ_1 — amplitude of the primary flexural mode; Ω — angular velocity.

As a result, the secondary oscillation (x_2) will appear in the nodes and allow us to measure the external angular velocity Ω . In spite of the fact that in the resonator there are no lumped masses, from the primary and secondary displacements of x_1 and x_2 point of view, the motion equations are recorded in the following form [8]:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + 2\zeta\omega\dot{x}_1 + (\omega^2 - \Omega^2)x_1 = q_1 - 2c\Omega\dot{x}_2 - c\dot{\Omega}x_2; \\ \ddot{x}_2 + 2\zeta\omega\dot{x}_2 + (\omega^2 - \Omega^2)x_2 = q_2 + 2c\Omega\dot{x}_1 + c\dot{\Omega}x_1, \end{cases} \quad (2)$$

where ζ — dimensionless attenuation (damping) coefficient of the resonator material; c — coupling coefficient of gyroscope (Brain coefficient); q_1 and q_2 — effective accelerations with an external forces along the primary and secondary displacements. When the primary and secondary oscillations coincide, the maximum sensitivity appears. Therefore, due to symmetry of the structure and equal primary and secondary oscillations, resonators in the ring form are promising configurations.

The relationship between the deformation, mechanical stress, electric displacement and electric field intensity in the piezoelectric materials is defined by the following expression [9]:

$$S_\alpha = s_{\alpha\beta}^E T_\beta + d_{ia} E_i; \quad (3)$$

$$D_i = d_{ia} T_\alpha + \varepsilon_{ij}^T E_j; \quad (4)$$

$$\alpha, \beta = 1, 2, \dots, 6, \quad i, j = 1, 2, 3,$$

where S_α — deformation; s — compliance tensor coefficient; T_β — mechanical stress; d_{ia} — piezoelectric constant tensor; E — electric field intensity; D — electric displacement; ε — dielectric constant tensor; T — transpose matrix index. The matrix of stiffness, dielectric permittivity tensor and piezoelectric constants of AlN [10] and PZT [11] are presented in table 1. In table 2 the basic properties of AlN and PZT [12] are compared.

Problem statement

The task carried out a harmonic analysis of the VRG resonator with a piezoelectric actuation based on the finite-element model by using of "CoventorWare®" integrated software package, version of 2012. The most important part of the piezoelectric modeling in this software package is the select material properties. Table 3 presents materials and their properties used during designing of the VRG. After selection of the material properties, the manufacturing process begins with de-

signing of a two-dimensional model. "Coventor's Designer" software package, integrating with the physical models of various devices, allows us to create automatically three-dimensional structures on the basis of a 2D. The lateral surface of AlN and PZT is used for actuation and detection of accordingly mechanical and electrical signals. The resonator design in CAD is based on the technology of the complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) and surface MEMS technology. Therefore, in the next step, the "Process Editor[®]" tool is applied for obtaining the corresponding design solutions. After determining of areas and faces of the whole structure, mesh is set for the implementation of the subsequent operations of modeling. The "Extruded Bricks" mesh has the quadrilateral plane-parallel volume form with a variable surface shape.

In other words, the model is divided into elements with the bricks form, so their lateral faces change their shapes in accordance with the surface forms, while the mesh construction goes from the surface into volume of the model. The given type of a mesh is the best for rings configuration. On axes X , Y , mesh value is selected as 50, 40, 30, 20 μm and on axis Z – 100 μm (fig. 3).

Maximum displacement results of the ring by applying constant electric voltage -5 and $+5$ V in points A and C (fig. 3) for different selected meshes are presented in table 4. It should be noted, that smaller meshes have a little influence on the modeling results.

"AnalyzerTM" module is the basic integrated environment for modeling, which includes various computing programs describing the electrical, mechanical and other properties. In this module boundary condition are given, the calculation programs will be set up and performed and results will be achieved. For reception of the frequency values and displacement of VRG resonator an analysis was carried out by piezoelectric tools. For creation of a homogeneous electric field, the piezoelectric actuation is induced by applying of an alternating electric voltage between areas A and C (fig. 3). At first 10 V voltage is applied, and then with a step of 20 V the voltage increases up to 70 V. The obtained results for the four samples are presented in fig. 4 (see the 4th side of cover). A comparison of the frequency characteristics (fig. 4, *a* and fig. 4, *b*) shows, that in case of application of PZT the resonator displacement increases almost by three orders (from the nanometer range up to the micrometer range).

Conclusion

By CoventorWare[®] software package, the VRG resonators with a piezoelectric actuation were modeled. Proceeding from the results of the frequency analysis and

finite element modeling it is possible to say that PZT is an appropriate and suitable piezoelectric material for the VRG resonators. Comparison of AlN and PZT shows obvious advantages of PZT and thus PZT allows a certain expansion of the displacement range of ring gyroscope.

The work was done with support of the Ministry of Education and Science of RF (state order, project code 8.5098.2017/BCh) and Presidium of RAS (Fundamental Research Section).

References

1. Timoshenkov S. P., Plehanov V. E., Timoshenkov A. S. Razrabotka matematicheskogo opisanija kol'cevogo mikrogiroskopa, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2014, no. 5, pp. 18–25 (in Russian).
2. Timoshenkov S. P., Plehanov V. E., Anchutin S. A., Zajrankin N. M., Pubchic V. G., Depnov I. S., Shilov V. F., Kochupina E. S. Balansirovka rezonatora kol'cevogo mikromehanicheskogo giroskopa, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2011, no. 11, pp. 37–44 (in Russian).
3. Anchutin S. A., Plehanov V. E. Primenenie metoda jelementov dlja analiza parametrov kol'cevogo rezonatora mikromehanicheskogo tverdotel'nogo volnovogo giroskopa, *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2007, no. 6, pp. 25–29 (in Russian).
4. Ahmed M. El-Sayed, Maged Ghoneima, Mohamed A. E. Mahmoud. Modeling of nonlinearities in vibratory ring gyroscope, *2013 Japan-Egypt International Conference on Electronics, Communications and Computers (JEC-ECC)*, Egypt, IEEE 2013, pp. 52–57.
5. Marinushkin P. S. Dynamic analysis of tubular piezoelectric gyroscope, *2010 International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. Novosibirsk, IEEE 2010, pp. 168–171.
6. Sushma Kotru, Alton Highsmith, Jian Zhong, Veronica Rincon, John E. Jackson, Paul Ashley. Feasibility study of micromachined single-axis vibratory gyroscope using piezoelectric PNZT thin films for actuation and sensing, *Smart Materials and Structures*, 2010, vol. 19, no. 8, pp. 1–12.
7. Matveev V. V., Raspopov V. J. *Osnovy postroenija besplat-formennyh inercial'nyh navigacionnyh system*, Sankt-Peterburg: GNC RF OAO "Koncern "CNII "Jelektropribor", 2009, 280 p. (in Russian).
8. Apostolyuk V. *Coriolis vibratory gyroscope — theory and design*, Kiev, Springer, 2016.
9. Marinushkin P. S. Razrabotka i issledovanie datchikov uglovoj skorosti s uluchshennymi metrologicheskimi harakteristikami dlja priborov kontrolja parametrov dvizhenija i deformacij obektov. Diss. ... na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tehnicheskikh nauk. Krasnoyarsk, FGAO VPO SUF, 2014, 121 p. (in Russian).
10. Vigevani G. *MEMS Aluminum Nitride Technology for Inertial Sensors*. PhD dissertation. Berkellely University of California, California, 2011.
11. Yi Tao, Xuezhong Wu, Dingbang Xiao, et al. Design, analysis and experiment of a novel ring vibratory gyroscope, *Sensors and Actuators A*, 2011, vol. 168, pp. 286–299.
12. Mahmud Al Ahman, Robert Plana. Piezoelectric coefficient of thin film aluminum nitride characterizations using capacitance measurements, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2009, vol. 19, no. 10, pp. 140–142.

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Технический редактор Т. А. Шацкая. Корректор Н. В. Яшина.

Сдано в набор 21.01.2018. Подписано в печать 28.02.2018. Формат 60×88 1/8. Заказ МС0318. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье И. К. Хмельницкого, Н. И. Алексеева, А. П. Бройко, В. Е. Каленова, А. В. Корлякова, А. В. Лагош, А. О. Лившиц, В. В. Лучинина

«Электромеханические преобразователи

на основе ионных полимер-полимерных композитов»

I.K. Khmelnitskiy, N.I. Alekseyev, A.P. Broyko, V.E. Kalyonov, A.V. Korlyakov,
A.V. Lagosh, A.O. Livshitz, V.V. Luchinin

«Electromechanical Transducers Based on Ionic Polymer-Polymer Composites»

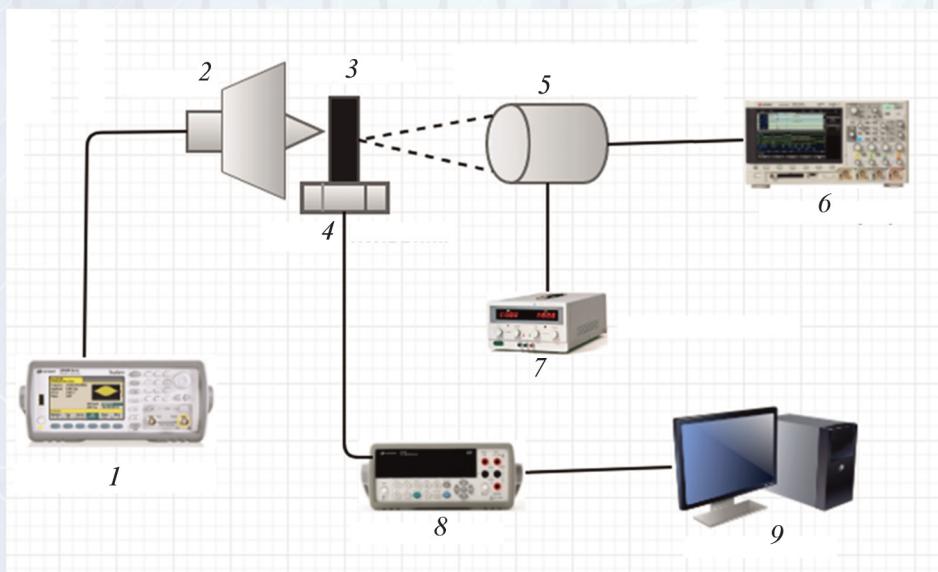


Рис. 4. Внешний вид центральной части измерительного стенда

Fig. 4. Appearance of the central part of the measuring stand

Рис. 3. Схема стенд для исследования ИППК-сensors:

1 – генератор сигнала; 2 – динамик; 3 – образец; 4 – пушки Кельвина; 5 – лазерный измеритель перемещения; 6 – осциллограф; 7 – источник питания; 8 – мультиметр; 9 – персональный компьютер

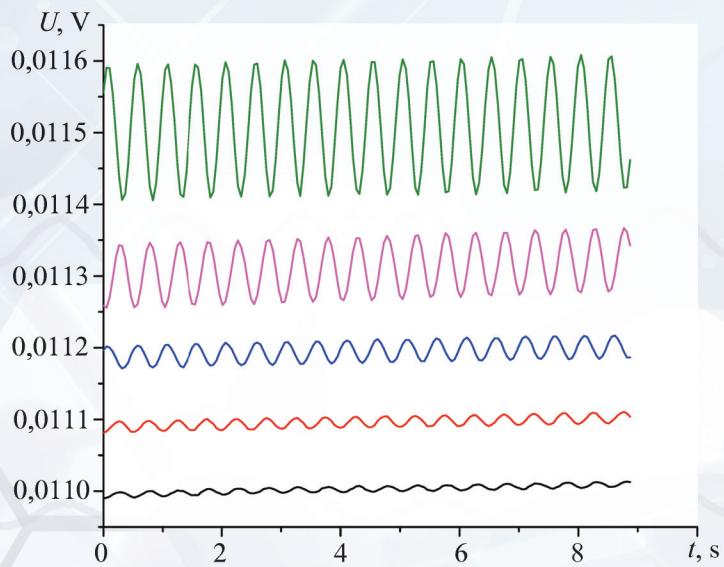
Fig. 3. Scheme of the stand for research of the IP²C sensors:

1 – signal generator; 2 – loudspeaker; 3 – sample; 4 – Kelvin rods; 5 – laser instrument for measuring of displacements; 6 – oscilloscope; 7 – power supply; 8 –multimeter; 9 –personal computer

Рис. 5. Зависимость выходного напряжения от времени (10 Гц) для образцов, выдержанных в ЭГ:

— 0,05 mm; — 0,10 mm;
— 0,20 mm; — 0,50 mm;
— 1,00 mm

Fig. 5. Dependence of the output voltage on time (10 Hz) for the samples kept in EG



Рисунки к статье К. Н. Кешаварздивколаи, В. Ф. Лукичева, В. А. Кальнова, Е. Ф. Певцова
«СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АИН И ЦТС, ПРИМЕНЯЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ РЕЗОНАТОРА В ВИБРАЦИОННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ГИРОСКОПАХ»

K. N. Keshavarzdivkolae, V. F. Lukichev, V. A. Kalnov, E. Ph. Pevtsov
«COMPARATIVE ESTIMATION OFAIN AND PZT FREQUENCY RESPONSE USED AS A RESONATOR IN THE VIBRATING RING GYROSCOPES»

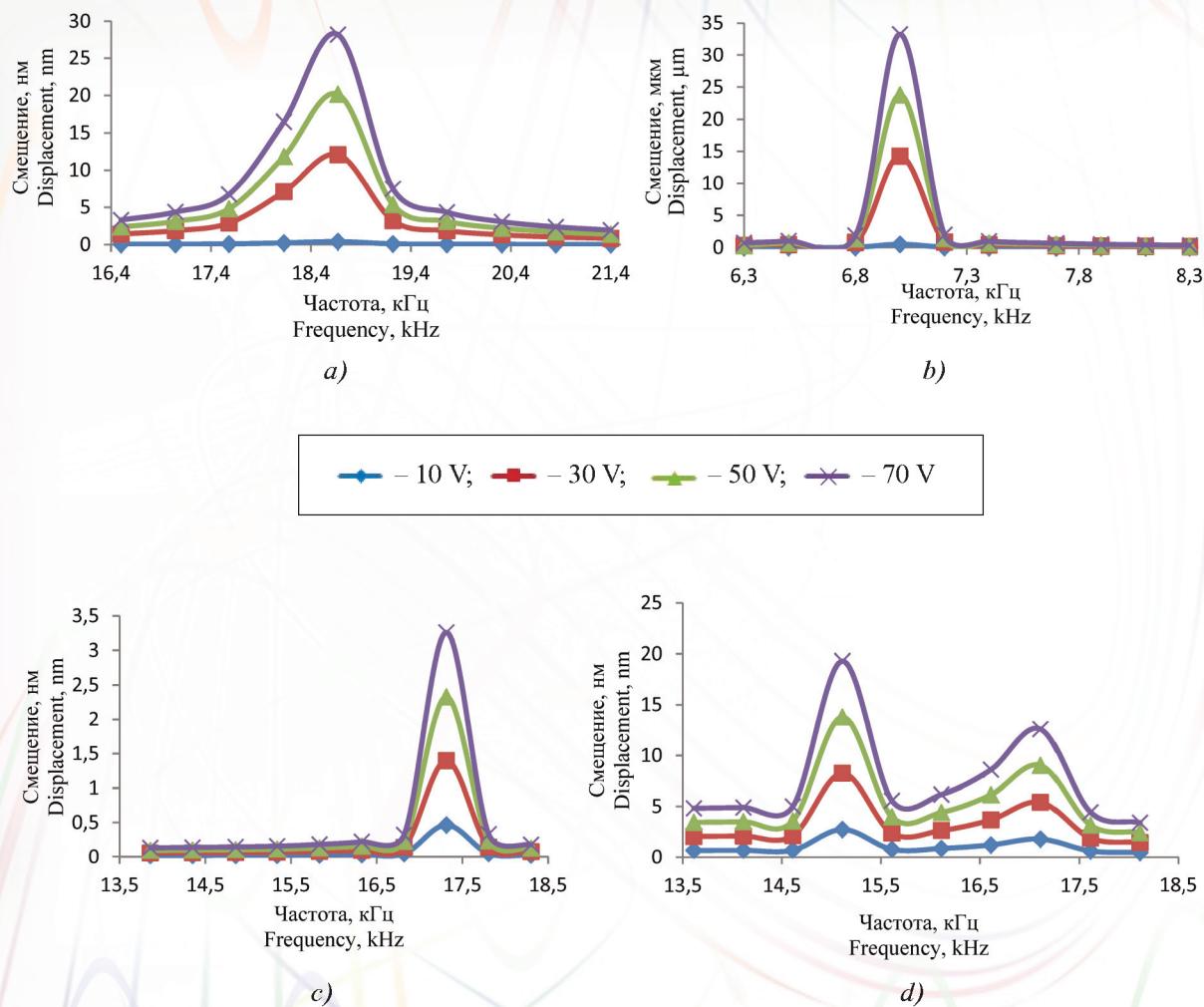


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика ВКГ – максимальное гармоническое смещение резонатора по оси Z:

a – АИН кольцо без подложки толщиной 100 мкм; b – ЦТС кольцо без подложки толщиной 100 мкм; c – АИН кольцо с подложкой ($Si = 100 \mu\text{m}$, $AlN = 1 \mu\text{m}$); d – ЦТС кольцо с подложкой ($Si = 100 \mu\text{m}$, $PZT = 1 \mu\text{m}$)

Fig. 4. Frequency response of the VRG – maximal harmonic displacement of the resonator along Z axis;
a – AlN ring without the substrate with 100 μm thickness; b – PZT ring without the substrate with 100 μm thickness; c – AlN ring with the substrate ($Si = 100 \mu\text{m}$, $AlN = 1 \mu\text{m}$); d – PZT ring with the substrate ($Si = 100 \mu\text{m}$, $PZT = 1 \mu\text{m}$)