

ISSN 1813-8586

НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

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

Том 22. № 3. 2020



Рисунки к статье С. В. Булярского, В. С. Белова, К. И. Литвиновой, Е. А. Першиной,
 Д. А. Коивой, М. В. Шибалова, Е. Р. Тимофеевой, А. П. Орлова
**«ОКСИД ГАФНИЯ В ТУННЕЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ
 НИКЕЛЬ – ДИЭЛЕКТРИК – АЛЮМИНИЙ»**

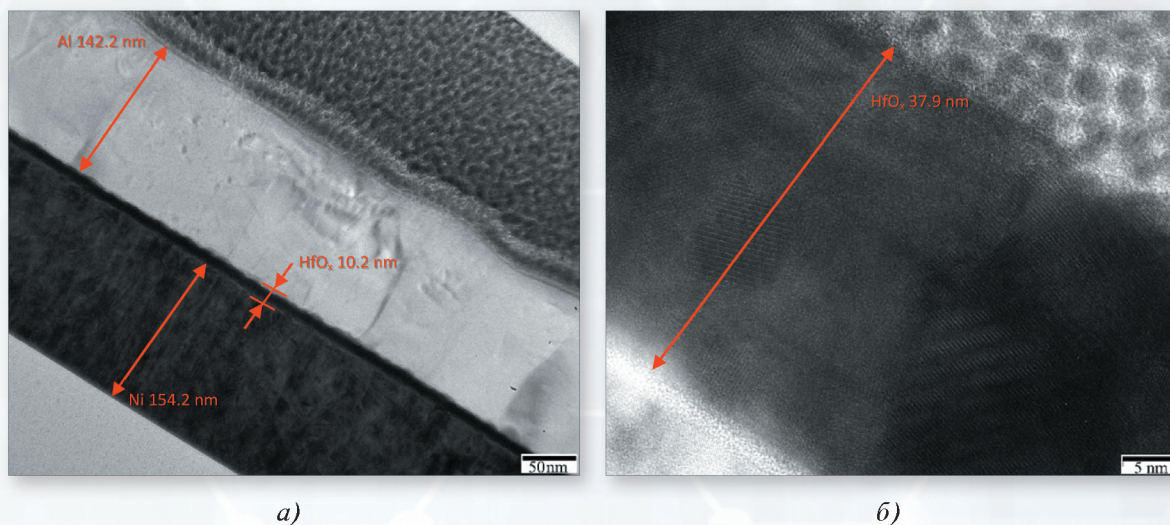


Рис. 1. Микрофотографии, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии:
 а – пленки HfO_x толщиной около 38 нм на подложке Si; б – срез МДМ-структуры

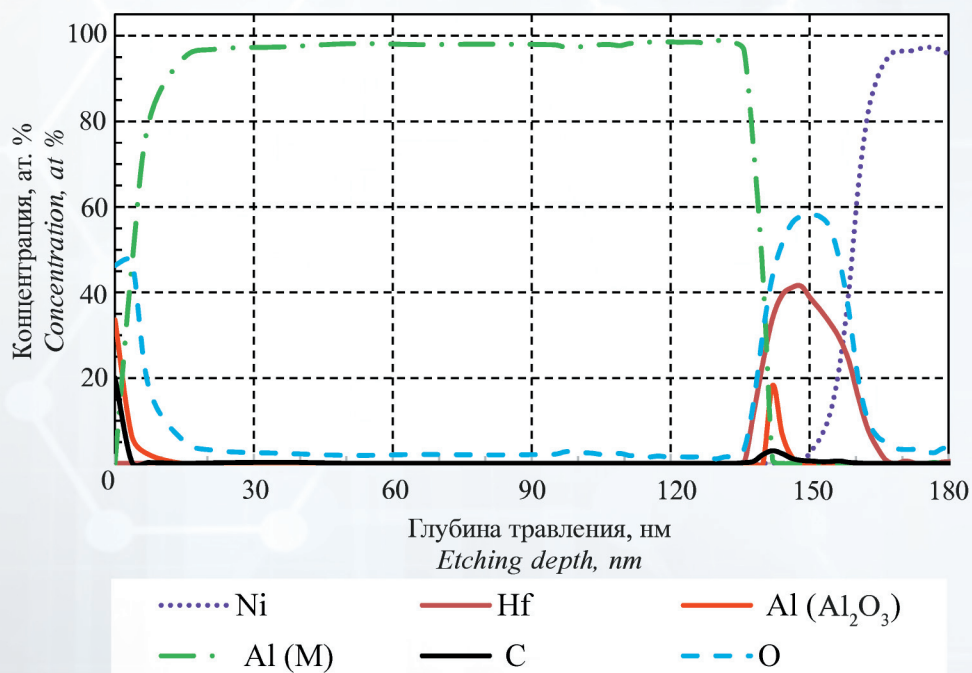


Рис. 2. ОЭС-профиль распределения атомов по глубине

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 22. № 3 ✧ 2020

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.

Журнал включен в Перечень международных реферируемых баз данных по научному направлению 02.00.00 химические науки

и в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по научным направлениям: 01.04.00 физика, 05.27.00 электроника.

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

Издается с 1999 г.

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:

Асеев А. Л., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН

Квардаков В. В., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Ковальчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Кульчин Ю. Н., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Лабуню В. А., д.т.н., проф., акад. НАНБ (Беларусь)

Нарайкин О. С., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

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.

Дайнеко А. В., к.х.н.

Кальнов В. А., к.т.н.

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.

Пожеда 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.

Тимошенко С. П., д.т.н.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н., доц.

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)

Чугунова А. В. (науч. ред.)

Щетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Тихонов Р. Д., Черемисинов А. А., Горелов Д. В., Казаков Ю. В. Магнитные свойства пленок Co—Ni—Fe, полученных электрохимическим осаждением по методу Тихонова 123

Булярский С. В., Белов В. С., Литвинова К. И., Першина Е. А., Коива Д. А., Шибалов М. В., Тимофеева Е. Р., Орлов А. П. Оксид гафния в туннельных структурах никель — диэлектрик — алюминий 136

Волобуев А. Н. Взаимодействие электромагнитной волны и метаматериала с киральными включениями индуктивного типа 140

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Мустафаева Д. Г. Конструктивно-технологические подходы при создании пленочных преобразователей 148

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Матюшкин И. В., Орлов О. М., Лебедев А. О., Мизгинов Д. С. Феномен нелинейной динамики при циклировании мемристора 153

Барулина М. А. Уравнения движения чувствительного элемента НЭМС-датчика как прямоугольной размерно-зависимой нанопластины 164

Кулакова А. А., Лукьяненко Е. Б. Оптимизированные триггерные схемы на логических КМОП-элементах 172

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 "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. 22

No. 3

2020

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)

Editorial council:

Aseev A. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
Chaplygin Ju. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
Gribov B. G., Dr. Sci. (Chem.), Cor.-Mem. RAS
Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Kuljchin Yu. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
Kvardakov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
Labunov V. A. (Belorussia), Sci. (Tech.), Acad. NASB
Narajkin O. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Ryzhii V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Surov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
Shevchenko V. Ya., Dr. Sci. (Chem.), Prof., Acad. RAS
Sigov A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS

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.)
Dayneko A. V., Cand. Sci. (Tech.)
Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.)
Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Ass. Prof.
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.
Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.)
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. (Research Editor)
Shchetinkin D. A. (site)

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

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Tikhonov R. D., Cheremisinov A. A., Gorelov D. V., Kazakov Iu. V.
The Magnetic Properties of the Co—Ni—Fe Films were obtained by Electrochemical Deposition by Tikhonov's Method 123

Bulyarskiy S. V., Belov V. S., Litvinova K. I., Pershina E. A., Koiva D. A., Shibalov M. V., Timofeeva E. R., Orlov A. P. Hafnium Oxide in Tunneling Structures Nickel — Dielectric — Aluminum . . . 136

Volobuev A. N. Interaction of Electromagnetic Wave and Metamaterial with Inductive Type Chiral Inclusions 140

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Mustafaeva D. G. Structural and Technological Approaches to the Creation of Film Converters 148

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Matushkin I. V., Orlov O. M., Lebedev A. O., Mizginov D. S. Compact Model of Nonlinear Dynamics while the Cycling of a Memristor 153

Barulina M. A. Equations of Motion of a NEMS-sensor's Sensing Element as Rectangular Size-Dependent Nanoplate 164

Kulakova A. A., Lukyanenko E. B. Optimized Trigger Circuits on Logic CMOS-Elements 172

Web: www.microsystems.ru/eng; e-mail: nmst@novtex.ru

Р. Д. Тихонов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: R.Tikhonov@tcen.ru,
А. А. Черемисинов, канд. техн. наук, нач. лаб., **Д. В. Горелов**, мл. науч. сотр.,
Ю. В. Казаков, мл. науч. сотр.
ГУ НПК "Технологический центр", Москва

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК Co—Ni—Fe, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ ПО МЕТОДУ ТИХОНОВА

Поступила в редакцию 17.12.2019

Для выяснения природы явлений, происходящих в электролите для электрохимического осаждения пленок CoNiFe и приводящих к различию относительного содержания элементов в электролите и в пленке, проведено спектрофотометрическое исследование хлоридных электролитов и электрохимическое осаждение пленок CoNiFe при температуре 70 °С. Экспериментальное исследование спектров поглощения и водородного показателя pH растворов солей FeCl₂, NiCl₂ и CoCl₂ при концентрации от 0,005 до 1 моль/л показывает сложный характер образования ионного баланса в одиночных и смешанных растворах и его зависимость от добавок кислот и щелочей. Осаждение пленок CoFeNi проводилось из хлоридного электролита с отношением содержания компонентов 1:1:1 при большой (0,48 моль/л) и малой (0,006 моль/л) концентрации. Содержание компонентов в пленке при электрохимическом осаждении из трехкомпонентного раствора FeCl₂, CoCl₂, NiCl₂ с равной концентрацией каждого компонента не соответствует составу электролита. Наиболее близким к составу электролита является состав при осаждении пленок CoFeNi в электролите с концентрацией каждого компонента 0,006 моль/л. Магнитная восприимчивость пленок тройной системы CoFeNi выше, чем пермаллоя. Поэтому тройная система перспективна для применения в преобразователях магнитного поля.

Ключевые слова: пленки CoNiFe, хлоридный электролит, ионный баланс, спектрофотометрический контроль, электрохимическое осаждение, намагниченность пленок

Введение

В российской периодической литературе отсутствуют публикации по магнитным свойствам осажденных электрохимическим методом пленок Co—Ni—Fe. В зарубежных изданиях имеется большое число публикаций о результатах исследований, которые обеспечили широкое применение тройного сплава Co—Ni—Fe в изделиях нано- и микроэлектроники [1–3] и в магнитной памяти с высокой плотностью упаковки [4, 5].

Для применения в микросистемах [1] толстые, до 100 мкм, пленки CoNiFe были получены электролитическим осаждением из сульфатного электролита с концентрациями, моль/л: Co — 0,053; Ni — 0,18 или 0,09, 0,107, 0,132, 0,18; Fe — 0,012...0,06 или 0,36 с комплексообразователями аммонием и борной кислотой. Сахарин и лаурилсульфат обеспечивали адгезию и снижение механических напряжений. В зависимости от концентрации Fe достигаются значения индукции насыщения $B_S = 1,5...2,0$ Т и низкая ко-

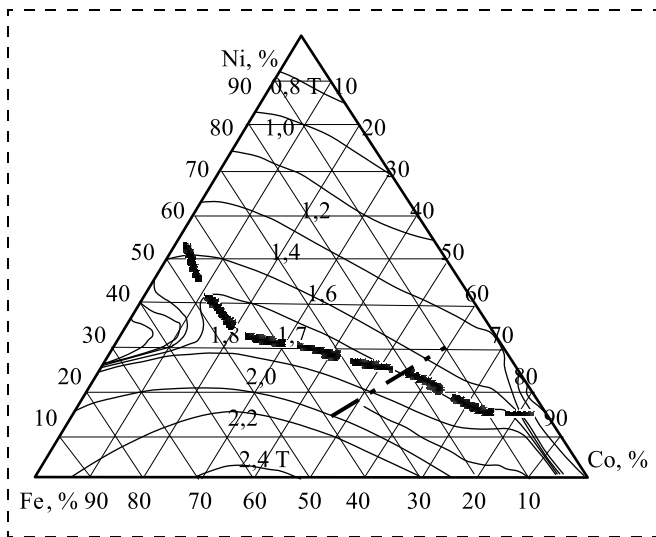


Рис. 1. Распределение значений индукции насыщения B_s в зависимости от состава тройного сплава Fe—Co—Ni в пленках (обозначено линиями штриховыми [1] и штрих-пунктирными [4]) и в монолитном сплаве (обозначено областями)

эрцитивная сила H_c менее 10 Э при составе сплавов, содержащих 40...50 ат. % Co, 15...30 % Ni и 30...40 % Fe.

Разработана [2] модель, описывающая электроосаждение нанометровых многослойных магниточувствительных структур FeCoNiCu/Cu. Модель основана на двухступенчатом механизме адсорбции при описании аномального соосаждения, конвективной диффузии массопереноса. Изменения в составе осадков предсказаны расчетом композиционного градиента в многослойных пленках.

В работе [3] механические напряжения в пленках CoNiFe связывают с содержанием Ni и уменьшением размера зерен.

Проведено изготовление [4] из сульфатного электролита без серосодержащих органических добавок тонких магнитных пленок $Co_{65}Ni_{12}Fe_{23}$ с относительно высоким насыщением намагничивания 2,1 Т, низкой коэрцитивной силой — 1,2 Э и высоким сопротивлением — 21 мкОм · см. Пленки имели большие механические напряжения и недостаточно высокое сопротивление для работы на частотах более 100 МГц. Различие магнитных свойств связывается как с составом, так и с различием структуры пленок с объемно- или гранецентрированной кубической ячейкой.

На рис. 1 для тройной системы Co—Ni—Fe приведены данные по индукции насыщения B_s для монолитного сплава и для пленок по данным работ [1] и [4].

Осаждение пленок CoNiFe при импульсном питании [5] изменяет соотношение примесей вследствие конкуренции двух явлений аномального соосаждения при коротких импульсах с обогащением железом и ограничения диффузией ионов железа при длинных импульсах с обогащением никелем. В соответствии с этим изменяются коэрцитивная сила и насыщение намагничивания. Получены магнитомягкие свойства $H_c \approx 1$ Э, μ до 1000 и насыщение намагниченности до 2,15 Т.

Несмотря на большое число работ [6—21] по технологии электрохимического осаждения тройной системы Co—Ni—Fe, еще имеется ряд нерешенных проблем, связанных, в первую очередь, с эффектом аномального осаждения металлов.

Магнитомягкие пленки CoNiFe получали [6] электрохимическим осаждением из сульфатного электролита с добавками хлористого аммиака и борной кислоты. Состав осадков сравнивали с составом ванны и условиями осаждения в потенциальном и токовом режимах. Установили, что в зависимости от плотности тока на катоде изменяется состав пленок при повторяемом составе электролита.

Изучены с точки зрения толщины и зависимости от подложки [7] свойства магнитомягких пленок CoNiFe, полученных электрохимическим осаждением из электролита с добавками сахара и лаурилсульфата натрия. Установлено изменение состава пленки по толщине.

Проведено исследование [8] структурных и магнитных свойств пленок Co—Ni—Fe, изготовленных электроосаждением в ванне из сульфатного электролита, содержащего, моль/л: $NiSO_4 - 1,15 - x$; $CoSO_4 - x$; $FeSO_4 - 0,85$ с хлоридом аммония при температуре 50 °С и токе 200 мА/см². Размер неровностей резко возрастает при содержании Co 40 ат. %, а размер зерна уменьшается при увеличении содержания Co. Коэрцитивная сила пленок Fe—Co—Ni меньше 0,25 Э поддерживается в пленках с содержанием Fe 22 %.

Когда содержание Co становится более чем 60 ат. %, коэрцитивная сила возрастает до 60 Э. Получены высокие значения насыщения намагниченности и температуры Кюри. На рис. 2 приведено сравнение распределения коэрцитивной силы в монолитном сплаве и в пленках.

Было установлено [9], что анионы Cl или SO_4 влияют на текущую эффективность, магнитные свойства, морфологию поверхности и фазы осаждаемых пленок. Была продемонстрирована ад-

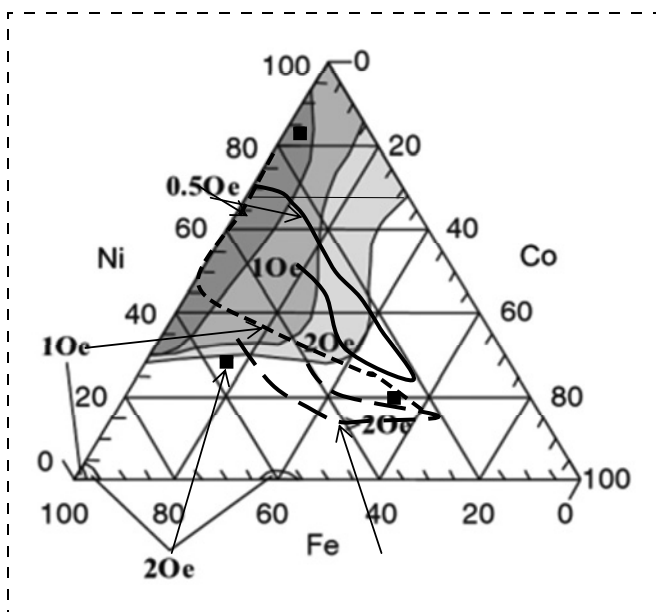


Рис. 2. Распределение значений коэрцитивной силы в зависимости от состава тройного сплава Fe—Co—Ni в пленках (обозначено линиями) и в монолитном сплаве (обозначено областями)

сорбция во всех значениях pH трех промежуточных структур на поверхности катода. Относительная скорость их образования и концентрация на поверхности зависят от pH раствора и потенциала электрода.

Для головок магнитной записи получены [10] электрохимическим осаждением пленки CoNiFe с высокой плотностью насыщения магнитного потока до 2,3 Т и коэрцитивной силой около 10,5 Э с составом 40...63 % Fe, 3...4 % Ni при добавке в электролит 0,1 г/л сульфалена.

Тройной сплав с примерно равным содержанием кобальта и железа используется в магнитных системах ввиду большого значения насыщения намагниченности. В работе [11] приведено значение 2,15 Т для магнитных пленок, полученных осаждением в ванне, содержащей борводород. Процессы из электролита, содержащего, моль/л: Ni — 0,017; Co — 0,022; Fe — 0,013, дают однородные, с высоким насыщением намагничивания пленки, с коэрцитивностью менее 2 Э. Ванны с диметиламин бораном и гипофосфитом дают мелкодисперсную аморфизированную структуру, позволяющую получать низкие значения коэрцитивной силы в пленках с составом, %: Co — 50...55; Ni — 20...24 и Fe — 22...25. Отмечается аномальное осаждение кобальта. Высокое удельное сопротивление пленок до 25 мкОм · см уменьшает до минимума потери.

Исследовано влияние концентрации кобальта [12] на структурные, композиционные, морфологические и магнитные свойства пленок. Рентгеновские исследования показали, что при оптимизированной концентрации кобальта пленки обладают поликристаллическим характером со смешанной (*fcc-bcc*) кубической структурой. Содержание кобальта увеличивается по мере снижения содержания никеля, в то время как содержание железа сначала увеличивается, а затем в конечном итоге уменьшается в сплаве CoNiFe. Измерения показывают высокое значение намагниченности насыщения выше 2 Т в магнитном поле 154 А/м для оптимально осажденных пленок.

Гранулированные пленки с составом $Ni_x(Co_{0,5}Fe_{0,5})_{1-x}$ ($x = 0,4...0,7$) получены [13] при электроосаждении из сульфатного электролита с добавками борной кислоты, хлорида аммония и лаурилсульфата при комнатной температуре. Содержание основных солей, моль/л: $CoSO_4$, $FeSO_4$ — 0,09; $NiSO_4$ — 0,02...0,44.

Результаты работы [14] показывают, что пленки CoNiFe, CoNiFeV и CoNiFeP являются смесями кристаллических и аморфных фаз, а бор/фосфорсодержащие добавки способствуют формированию аморфного состояния. Включение бора почти не изменяет плотность насыщения магнитного потока. Добавление фосфора значительно увеличивает размер частицы пленки и снижает ее коррозионную устойчивость. В пленках CoNiFeP уменьшается плотность насыщения магнитного потока до 1,25 Т.

Магнитомягкие тонкие пленки с низкой коэрцитивной силой, высокой плотностью насыщения магнитного потока и высоким удельным сопротивлением на основе сплавов переходных металлов Fe, Co, Ni являются основой для хранения магнитных данных с высокой плотностью. В работе [15] рассматривается возможность получения пленок CoNiFeV химическим осаждением.

Публикация [16] посвящена рассмотрению причин изменения удельного электросопротивления и удельной намагниченности под действием рентгеновского излучения в процессе осаждения пленок CoNiFe, обусловленного изменением морфологии поверхности, элементного состава, уменьшением пористости и увеличением скорости осаждения.

Магнитные исследования показали [17], что при электрохимическом осаждении по мере увеличения плотности тока с 50 до 450 мА/см² ко-

эрцитивная сила снизилась с 257 до 72 Э, а намагниченность насыщения увеличилась с 6,58 до $88,85 \cdot 10^{-3}$ Т для магнитного поля в плоскости пленок CoNiFe. Анализ поверхности показал пористую природу тонких пленок.

Электрохимическое осаждение пленок CoNiFe было исследовано [18] при потенциале осаждения от 1,8 до 3,0 В. Структура решетки пленок была гранецентрированная кубическая. По мере увеличения потенциала осаждения содержание Ni увеличивается, а содержание Co и Fe уменьшается. Магнитные измерения показали, что намагниченность насыщения сплавов увеличивается с 748 до $786 \cdot 10^{-3}$ Т, а коэрцитивная сила уменьшается с 28,7 до 25,9 Э по мере увеличения потенциала осаждения. Изменение свойств пленок при изменении потенциала связывают с изменением структуры.

Пленки Co—Ni—Fe с малой коэрцитивной силой получены [19] из раствора солей FeCl₂, NiCl₂ и CoCl₂ в смеси хлорид холина и этиленгликоля. Низкая коэрцитивная сила была получена при концентрации Fe от 30 до 80 ат. %. Обнаружено, что богатые Fe пленки имеют некоторые преимущества как магнитомягкие материалы, вследствие их высокой плотности насыщения намагниченности и очень тонкой кристаллической структуры.

Проведено [20] электрохимическое осаждение Co—Ni—Fe пленки в аммоний-хлоридной электролитической ванне. Показано, что происходит рост коэрцитивной силы при увеличении содержания Co до 60 ат. %, что связывается с увеличением шероховатости поверхности и изменением кристаллической фазы.

Пленки Co—Ni—Fe осаждались электрохимическим методом из сульфат-хлоридного электролита [21], содержащего, моль/л: NiSO₄ — 0,304; NiCl₂ — 0,084; CoSO₄ — 0,1; FeSO₄ — 0,036; H₃BO₃ — 20 г/л; 2 г/л стабилизатора; 4 г/л винной кислоты; 4 г/л отбеливателя и 0,1 г/л смачивающего агента и добавки виннокаменной кислоты. Оптимальные условия для получения качественных пленок Fe_{15,6–20,6}Co_{43,8–61,9}Ni_{22,5–40}; плотность тока 4 А/дм²; температура 40 °С; рН 2,3...3,2; концентрация винной кислоты 8...12 г/л; молярное соотношение $Co^{2+}/Ni^{2+} = 0,26...0,4$. Состав пленки зависит от плотности тока, температуры электролита и рН. Наблюдается отношение содержания элементов в электролите и пленке CRL для Fe, Co = 3, а для Ni = 0,5. Кобальт и же-

лезо осаждаются с концентрацией большей, чем в электролите, а никель — с меньшей.

Указанные зависимости состава пленок тройного сплава не позволяют получать нужный состав пленок, соответствующий составу электролита.

В данной работе для выяснения природы явлений в электролите для получения пленок CoNiFe, приводящих к различию относительного содержания элементов в электролите и в пленке, проведены спектрофотометрическое исследование хлоридных электролитов и электрохимическое осаждение пленок CoNiFe при температуре 70 °С.

1. Конгруэнтное электрохимическое осаждение NiFe из хлоридного электролита

Исследование электрохимического осаждения пленок тройного сплава CoNiFe проводили с использованием опыта применения метода Тихонова конгруэнтного электрохимического осаждения пленок пермаллоя NiFe из хлоридного электролита [22—29]. При электрохимическом осаждении с температурой ванны более 60 °С состав пленки NiFe соответствует составу электролита [28]. При комнатной температуре осаждения концентрация железа в пленках отличается более чем в два раза от концентрации в электролите. Напряжение между электродами уменьшается при повышении температуры и постоянном значении тока. Уменьшение падения напряжения между катодом и анодом при повышении температуры свидетельствует о повышении проводимости электролита за счет более полной диссоциации солей и образования двухзарядных ионов вместо однозарядных.

В разбавленных электролитах на основе солей NiCl₂, FeCl₂ процесс осаждения происходит [29] при комнатной температуре в соответствии с разным содержанием ионов железа. Осаждение при комнатной температуре дало зависимость содержания железа в пленках от концентрации солей в электролите с изменением содержания железа в пленке от 34 до 13 %. В разбавленном хлоридном электролите пленки пермаллоя с составом Fe₁₉Ni₈₁ получают при конгруэнтном электрохимическом осаждении из простого хлоридного электролита с отношением $C_{Ni}/C_{Fe} = 4,26$ при концентрации Fe⁺² — 0,004 моль/л. При малой концентрации хлоридов никеля и железа в электролите происходит полная ионизация при

комнатной температуре и заряды ионов никеля и железа Ni^{2+} Fe^{+2} имеют при разряде на катоде одинаковое значение — 2.

2. Исследование растворов солей при концентрации до 1 моль/л

Обзор литературы показывает, что для получения пленок $CoFeNi$ используют составы электролита с концентрацией компонентов

0,01...1 моль/л. Спектры поглощения электролита с концентрацией компонентов 0,005...1 моль/л исследовали на спектрофотометре В-1100 в односантиметровых кюветках в спектральном диапазоне 315...1050 нм. На рис. 3, а—в представлены оптические спектры поглощения при комнатной температуре водных растворов с пиками поглощения на длинах волн света: $FeCl_2$ — 345 и 975 нм; $NiCl_2$ — 657 и 720 нм; $CoCl_2$ — двоянный пик поглощения 495, 525 нм. На рис. 3, г

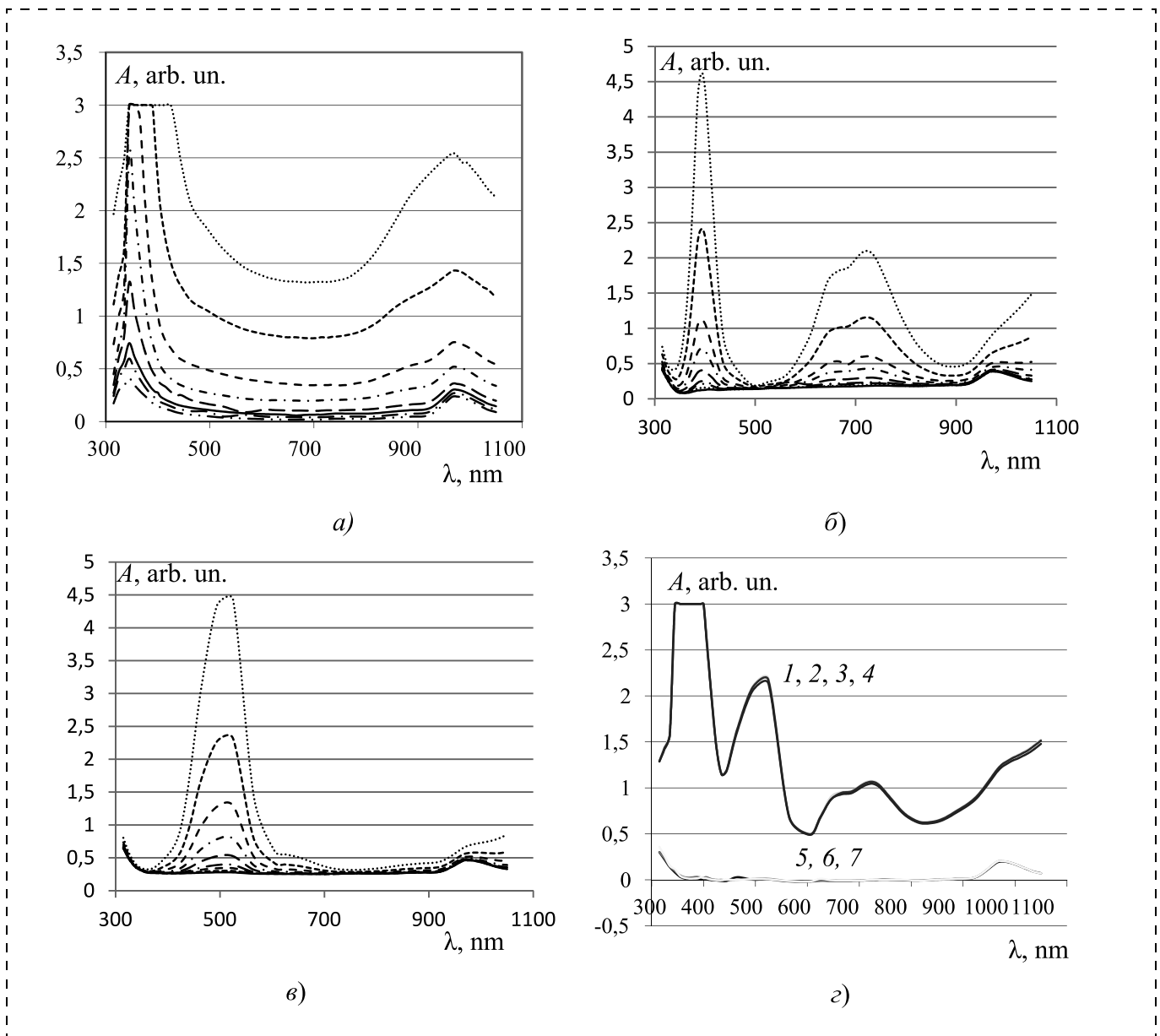


Рис. 3. Зависимость оптического поглощения A на длинах волн 315...1050 нм водных растворов:
 а — $FeCl_2 \cdot 6H_2O$; б — $NiCl_2 \cdot 6H_2O$; в — $CoCl_2 \cdot 6H_2O$; с концентрациями, моль/л: 0,96; 0,48; 0,24; 0,12; 0,06; 0,03; 0,02; 0,01; 0,005; г — хлоридного электролита 1 с концентрацией 0,476 моль/л каждого компонента $CoCl_2$, $NiCl_2$, $FeCl_2$; 2 — электролит по п. 1 с добавкой H_3BO_3 20 г/л; 3 — электролит по п. 2 с добавкой сахараина 1,5 г/л; 4 — электролит по п. 3 с добавкой HCl 3 мл/л; 5 — с концентрацией 0,0074 моль/л каждого компонента $CoCl_2$, $NiCl_2$, $FeCl_2$; 6 — электролит по п. 5 с добавкой H_3BO_3 20 г/л; 7 — электролит по п. 6 с добавкой сахараина 1,5 г/л

представлены оптические спектры поглощения при комнатной температуре водных растворов при смешивании всех трех компонентов. На рис. 3, *г* кривые 1–4 показывают, что электролит с концентрацией 0,476 моль/л каждого компонента CoCl_2 , NiCl_2 , FeCl_2 имеет те же пики поглощения, что и растворы отдельных компонентов. Добавки борной кислоты и сахарина практически не изменяют спектр. Добавка 4 ммоль/л HCl уменьшает интенсивность поглощения и очищает электролит. Добавка NH_4OH 40 мл на литр раствора создала черный осадок гидроксидов $\text{Co}(\text{OH})_2$, $\text{Ni}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ с $\text{pH} = 7,7$.

На рис. 3, *г* кривые 5–7 показывают, что электролит с концентрацией 0,0074 моль/л каждого компонента CoCl_2 , NiCl_2 , FeCl_2 имеет те же пики поглощения, что и растворы отдельных компонентов. Интенсивность поглощения намного меньше при уменьшении концентрации в 64 раза, но добавки борной кислоты и сахарина практически не изменяют спектр. При добавлении в раствор CoCl_2 , NiCl_2 , FeCl_2 0,2 ммоль/л соляной кислоты спектр практически не изменяется. При добавлении в раствор 0,2 ммоль/л NH_4OH происходит сильное увеличение поглощения и, следовательно, повышение ионизации солей. Увеличение поглощения в растворе CoCl_2 , NiCl_2 , FeCl_2 по каждому компоненту электролита происходит при щелочном характере раствора с $\text{pH} = 7,8$ вместо начального $\text{pH} = 3,95$. Атомы кобальта, никеля и железа переходят в

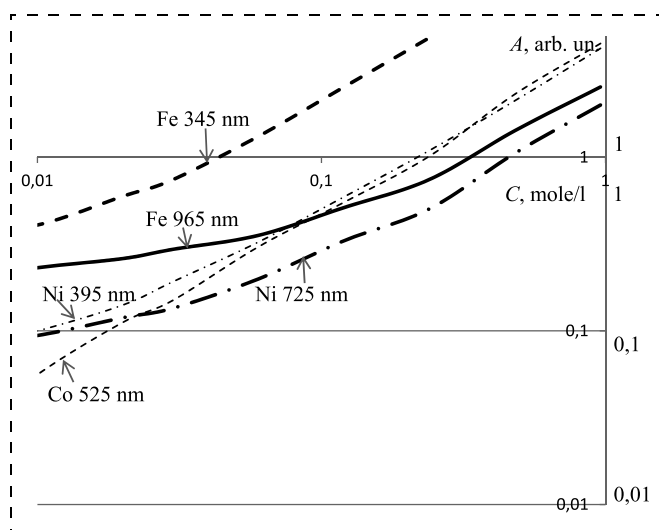


Рис. 4. Зависимость логарифма интенсивности пиков поглощения A для однокомпонентных растворов $\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — 345 нм, 965 нм; $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — 395 нм, 725 нм; $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — 525 нм от концентрации растворов C в диапазоне 0,005...0,96 моль/л

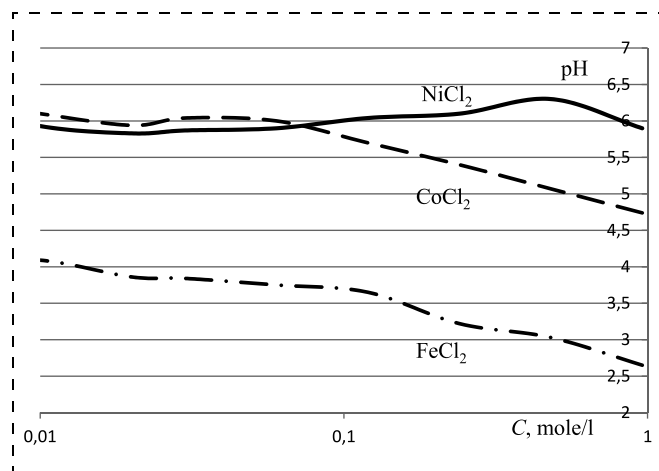


Рис. 5. Зависимость pH растворов CoCl_2 , NiCl_2 , FeCl_2 от концентрации C

состояние двухзарядных ионов. Таким образом, повышение ионизации никеля, а также кобальта и железа в трехкомпонентном растворе CoCl_2 , NiCl_2 , FeCl_2 с концентрацией каждого компонента 0,01 моль/л можно получить за счет щелочной добавки в электролит.

Очевидно существенное различие взаимодействия концентрированного и слабого растворов солей с кислотой и щелочью.

Зависимости логарифма интенсивности пиков поглощения A для однокомпонентных растворов $\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — 345 нм, 965 нм; $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — 395 нм, 725 нм; $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — 525 нм от концентрации растворов C в диапазоне 0,005...0,96 моль/л представлены на рис. 4. Зависимости для никеля при длине волны 725 нм и железа при длине волны 965 нм от концентрации изменяют наклон при 0,2 моль/л. Зависимость интенсивности пика кобальта при длине волны 525 нм практически не изменяет свой наклон. Наблюдается нелинейная зависимость интенсивности пиков поглощения для никеля и железа, что свидетельствует об ионизации атомов.

Во всех растворах измерялся водородный показатель pH . Зависимость показателя pH от концентрации однокомпонентных растворов представлена на рис. 5. При концентрации 1 моль/л растворение NiCl_2 дает $\text{pH} = 5,8$, CoCl_2 — $\text{pH} = 4,7$; FeCl_2 — $\text{pH} = 2,7$. Значение pH характеризует ионный баланс: концентрацию водорода, гидроксидов, кислотность или щелочность воды. Следовательно, гидролиз железа снижает концентрацию водорода при диссоциации воды сильнее всего и увеличивает количество гидроксидов.

Следует отметить, что изменение рН при разбавлении раствора не является монотонным. На зависимости имеются локальные пики и смена наклона. Значит, уменьшение концентрации примеси сопровождается изменением степени ионизации и заряда ионов. Локальные пики расположены на зависимостях при разных концентрациях солей: NiCl_2 , — 0,5 моль/л; CoCl_2 — 0,03 моль/л; FeCl_2 — 0,02 моль/л. Для получения одинакового уровня ионизации солей необходимо иметь растворы каждой из солей порядка или 1 моль/л, или 0,01 моль/л.

Проведенное экспериментальное исследование спектров поглощения и водородного показателя рН растворов солей FeCl_2 , NiCl_2 и CoCl_2 при концентрации до 1 моль/л показывает сложный характер образования ионного баланса в одиночных и смешанных растворах и его зависимость от добавок кислот и щелочей.

3. Электрохимическое осаждение пленок CoFeNi

Для осаждения пленок CoFeNi использован хлоридный электролит с составом, моль/л: $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — 0,006; $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ — 0,006; $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — 0,006. В электролит добавляли: гидрат аммония NH_4OH — 0,4 мл/л, борную кислоту — H_3BO_3 — 20 г/л, гидрат сахарината натрия $\text{C}_7\text{H}_4\text{NaNO}_3\text{S} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ — 1,5 г/л. Пленка из указанного электролита с соотношением молярного содержания 1:1:1 осаждается в электрохимической установке с гальванической ванной объемом 2 л с графитовым анодом. Никелевый кольцевой электрод катода контактирует с металлизированной кремниевой пластиной и располагается вертикально. Прямоугольные области пленки пермаллоя размером $0,5 \times 1,0$ мм получали через фоторезистивную маску на металлизированной с помощью слоев NiCr, Ni поверхности кремниевой пластины диаметром 100 мм, покрытой слоем SiO_2 . Электролит имел темпе-

ратуру 70°C за счет нагрева погружным нагревателем и перемешивания магнитной мешалкой. Основным параметр процесса — силу тока поддерживали постоянной при плотности тока $8,2 \text{ mA/cm}^2$ в областях кремниевой пластины, не покрытых фоторезистом.

Толщину пленок измеряли с помощью микроинтерферометра анализатора микросистем MSA-500. Исследование состава пленок проведено с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализатора Philips XL 40. Намагниченность пленок на пластинах определяли по потоку магнитного поля на анализаторе магнитных свойств пленок MESA-200.

Характеристики полученных пленок показаны в табл. 1, где приведены следующие параметры: водородный показатель электролита рН; ток I и плотность тока J в области катода; длительность процесса осаждения t ; толщина пленки h и скорость осаждения V ; содержание компонентов Fe, Co, Ni в пленке; магнитные свойства пленок: насыщение намагничивания B , удельное насыщение B/h и коэрцитивная сила H_c .

Зависимость состава пленок, полученных электрохимическим осаждением из трехкомпонентного раствора FeCl_2 , CoCl_2 , NiCl_2 с концентрацией каждого компонента 0,006 моль/л, от добавок в электролит представлена в виде гистограммы на рис. 6. Содержание компонентов близко к составу электролита без добавок. Добавка гидрата аммония изменяет рН с 4,04 на 3,95 и увеличивает относительное содержание кобальта в пленке, уменьшая содержание никеля. Последующая добавка борной кислоты изменяет рН до значения 2,75, а сахарина — до 2,8, т. е. незначительно. Относительное содержание кобальта в пленке выше, железа ниже, а содержание никеля уменьшается близко к исходному электролиту. Состав пленок, полученных при осаждении из одного и того же электролита в одинаковом режиме и при добавках гидрата аммония, борной кислоты и сахарина, имеет раз-

Таблица 1

Параметры электрохимического осаждения пленок CoFeNi из электролита с содержанием хлоридов 0,006 моль/л

№ пластины	рН	Ток I , мА	J , мА/см ²	t , мин	h , мкм	V , нм/мин	Fe, %	Co, %	Ni, %	B , нВб	B/h	H_c , Э
05	4,04	180	8,2	30	3,33	0,11	32,5	38,2	29,3	220	66	8
06	3,95	180	8,2	30	1,2	0,04	34	47,5	18,5	85	71	9
07	2,75	180	8,2	30	2,6	0,087	21,6	43,1	35,3	155	60	1,7

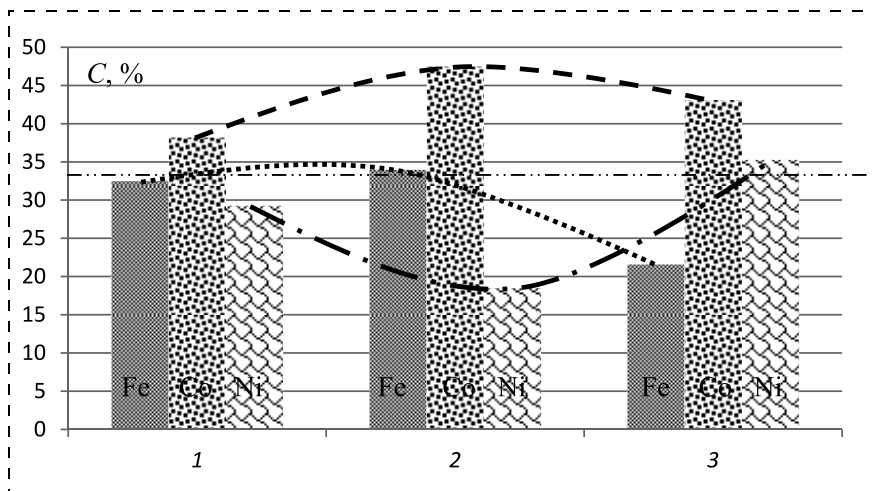


Рис. 6. Гистограмма состава пленок, полученных электрохимическим осаждением из трехкомпонентного раствора FeCl_2 , CoCl_2 , NiCl_2 с концентрацией каждого компонента 0,006 моль/л (1) и с добавками: гидрата аммония (2), борной кислоты и сахарина (3)

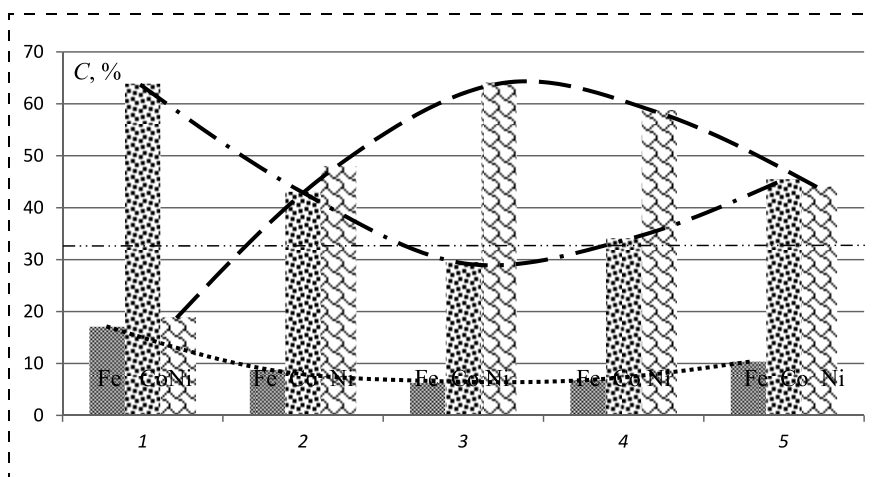


Рис. 7. Гистограмма состава пленок, полученных из трехкомпонентного раствора FeCl_2 , CoCl_2 , NiCl_2 с концентрацией каждого компонента 0,48 моль/л (1) и с добавками: борной кислоты (2), сахарина (3), соляной кислоты (4) и при увеличении времени осаждения в 3 раза (5)

личие относительного содержания компонентов в два раза.

Можно заключить, что в слабом электролите для осаждения пленок CoFeNi наиболее близким к относительному составу электролита является состав пленки без добавок. Добавки гидрата аммония, борной кислоты и сахарина влияют на состав пленок вследствие изменения ионного баланса.

При большой концентрации электролита из трехкомпонентного раствора FeCl_2 , CoCl_2 , NiCl_2 с концентрацией каждого компонента 0,48 моль/л был проведен эксперимент на пластинах № 17–20 (табл. 2) при тех же параметрах процесса, как при малой концентрации. Характеристики полученных пленок приведены в табл. 2. Зависимость состава пленок, полученных электрохимическим осаждением из трехкомпонентного раствора FeCl_2 , CoCl_2 , NiCl_2 с концентрацией каждого компонента 0,48 моль/л, от добавок в электролит представлена в виде гистограммы на рис. 7. Содержание компонентов далеко от состава электролита без добавок.

Добавки борной кислоты и сахарина, соляной кислоты уменьшают содержание железа и кобальта и увеличивают содер-

Таблица 2

Параметры электрохимического осаждения пленок CoFeNi из электролита с содержанием хлоридов 0,48 моль/л

№ пластины	pH	Ток I , мА	J , мА/см ²	t , мин	h , мкм	V , нм/мин	Fe, %	Co, %	Ni, %	V , нВб	V/h	H_c , Э
17	2,78	180	8,2	30	2,04	68	17,1	63,9	18,9	225	110	43
18	2,17	180	8,2	30	3,0	100	8,81	43,1	48,1	205	68	9
19	1,34	180	8,2	30	3,9	130	6,32	29,5	64,2	134	34	9
20	1,45	180	8,2	90	11,8	131	6,87	34,2	58,8	247	21	8
12	1,54	250	4,6	120	8,6	72	4,48	18,6	76,9	540	63	26
13	1,59	500	9,2	60	9,1	152	25,1	57,8	17,1	1217	134	17
14	1,61	750	13,8	40	10,8	270	43,6	48	8,4	1179	109	20
15	1,54	1000	18,4	30	19,6	650	45	47	8,3	1239	63	20

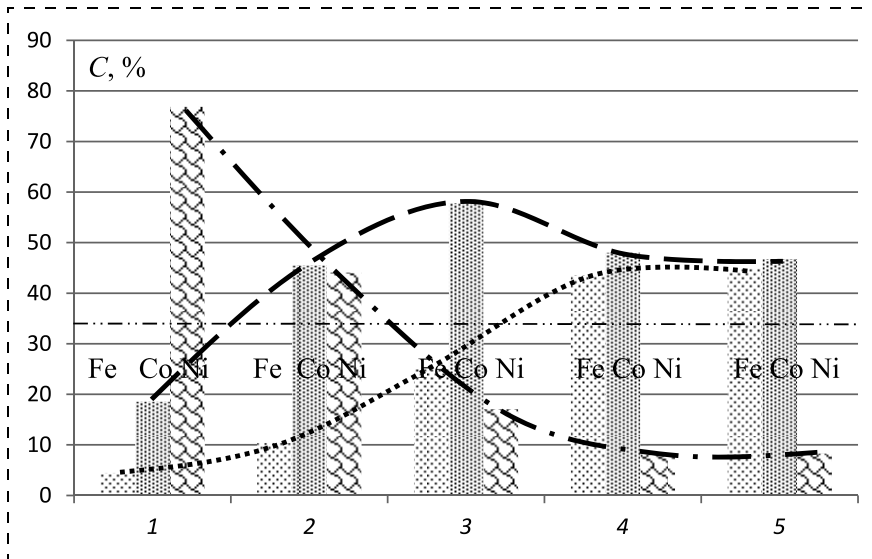


Рис. 8. Гистограмма состава пленок, полученных из трехкомпонентного раствора FeCl_2 , CoCl_2 , NiCl_2 с концентрацией каждой компоненты 0,48 моль/л, с добавками:

борной кислоты, сахарина, соляной кислоты и при плотности электрического тока, mA/cm^2 : (1) 5; (2) 10; (3) 10; (4) 15; (5) 20

жание никеля. Увеличение времени осаждения в 3 раза до 90 мин повысило содержание железа и кобальта и уменьшило содержание никеля, следовательно, состав пленки зависит от времени осаждения.

Влияние плотности электрического тока, протекающего через поверхность подложки на катоде, на состав пленок проверяли электрохимическим осаждением из электролита с концентрацией примесей 0,48 моль/л и добавками борной кислоты, сахарина и соляной кислоты на пластинах без фоторезиста при плотности тока катода 5...20 mA/cm^2 и температуре 70 °С. Зависимость состава пленок, полученных электрохимическим осаждением из трехкомпонентного раствора FeCl_2 , CoCl_2 , NiCl_2 с концентрацией каждого компонента 0,48 моль/л с добавками в электролит, представлена в виде гистограммы на рис. 8. Содержание компонентов в пленке отличается от состава электролита.

Относительное содержание Fe, Co, Ni в пленке сильно изменяется в зависимости от плотности тока. Подобрать режим, обеспечивающий воспроизведение состава электролита в осаждаемой пленке, затруднительно.

Состав пленок при электрохимическом осаждении из трехкомпонентного раствора FeCl_2 , CoCl_2 , NiCl_2 с концентрацией каждого компонента 0,006 моль/л зависит от добавок в электролит гидрата аммония, борной кислоты и са-

харина, но относительное содержание компонентов Fe, Co, Ni в пленке наиболее близко к составу электролита без добавок.

Зависимость состава пленок, полученных электрохимическим осаждением из трехкомпонентного раствора FeCl_2 , CoCl_2 , NiCl_2 с концентрацией каждого компонента 0,48 моль/л, от добавок в электролит борной кислоты, сахарина и соляной кислоты носит сложный характер. Относительное содержание компонентов Co, Ni, Fe в пленке не соответствует составу электролита и сильно изменяется в зависимости от плотности тока.

Магнитные свойства пленок Co—Ni—Fe представлены в табл. 1 и 2 и на рис. 9.

Для сравнения на рис. 10 и 11

приведены нормированные по толщине намагниченность и производная нормированной намагниченности пленок $\text{Co}_{43,1}\text{Ni}_{35,3}\text{Fe}_{21,6}$ (1) и $\text{Ni}_{81,6}\text{Fe}_{18,4}$ (2) в зависимости от приложенного магнитного поля. Крутизна линии намагничивания тройной системы выше в 1,7 раза, что позволяет считать тройную систему перспективной для применения в преобразователях магнитного поля.

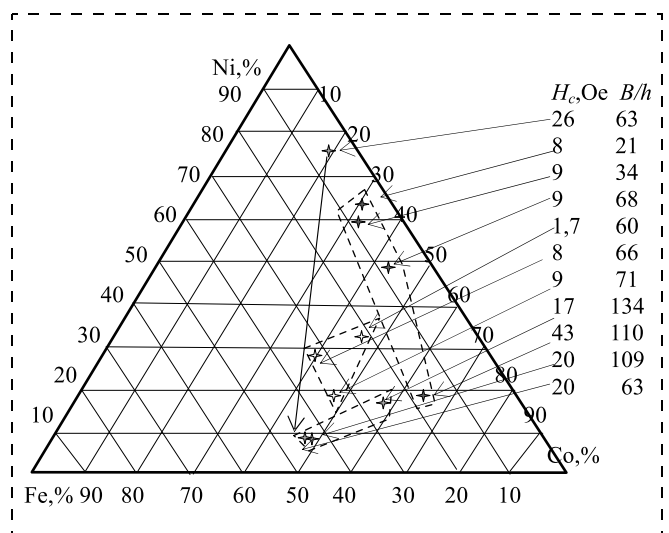


Рис. 9. Распределение значений коэрцитивной силы и удельного насыщения магнитной индукции в зависимости от состава тройного сплава Fe—Co—Ni в пленках, изготовленных электрохимическим осаждением из хлоридного электролита

4. Обсуждение результатов

Проведенное экспериментальное исследование спектров поглощения и водородного показателя pH растворов солей FeCl_2 , NiCl_2 и CoCl_2 при концентрации до 1 моль/л показывает сложный характер образования ионного баланса в одиночных и смешанных растворах и его зависимость от добавок кислот и щелочей. Содержание компонентов в пленке при электрохимическом

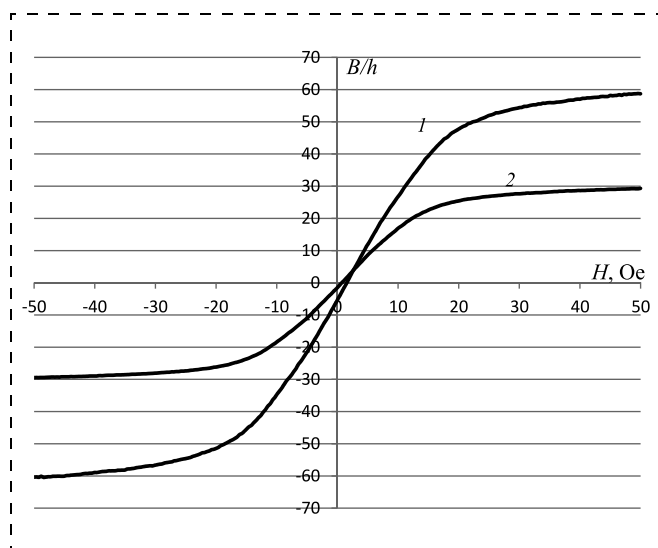


Рис. 10. Нормированная по толщине зависимость намагничивания пленок $\text{Co}_{43,1}\text{Ni}_{35,3}\text{Fe}_{21,6}$ (1) и $\text{Ni}_{81,6}\text{Fe}_{18,4}$ (2)

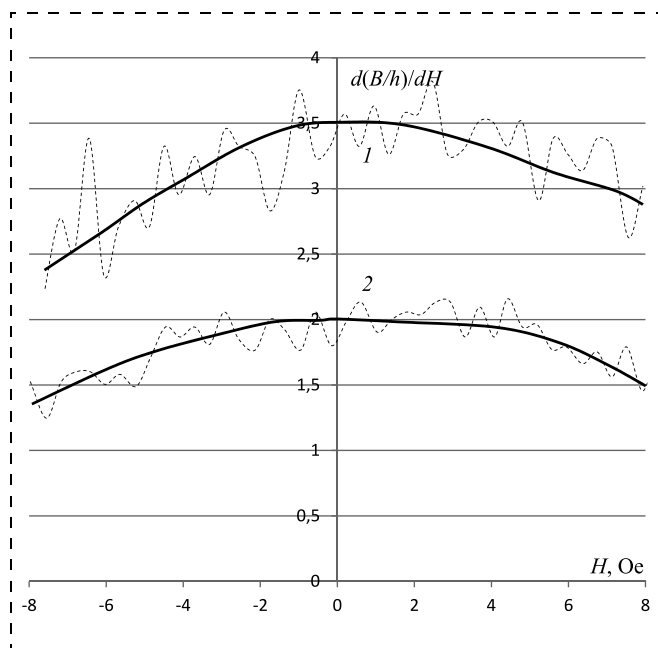


Рис. 11. Первая производная нормированной зависимости намагничивания пленок CoNiFe (1) и NiFe (2)

ком осаждении из трехкомпонентного раствора FeCl_2 , CoCl_2 , NiCl_2 с равной концентрацией каждого компонента не соответствует составу электролита. Наиболее близким к относительному составу электролита является состав пленки при осаждении пленок CoFeNi в электролите с концентрацией каждого компонента 0,006 моль/л.

В работах по электрохимическому осаждению железа, никеля и кобальта рассматриваются эти металлы в составе электролита как двухвалентные ионы, в соответствии с валентностью металла, образующего соль. Неполная диссоциация солей в электролите оказывает существенное влияние на скорость электрохимического осаждения вследствие зависимости эффективности тока от заряда ионов, которые создают ток на катоде.

Факторы, оказывающие влияние на диссоциацию солей [30, 31]:

1. Природа соли. Чем слабее основание и кислота, образующие соль, тем она сильнее гидролизуется.

2. Концентрация соли. При разбавлении степень гидролиза растет, так как растет число молекул воды, являющихся исходным веществом в реакции гидролиза, поэтому по принципу Ле Шателье равновесие смещается вправо.

3. Температура. При повышении температуры степень гидролиза увеличивается, так как равновесие смещается вправо.

4. Присутствие одноименных ионов. Если в раствор соли, имеющий кислую реакцию, добавить кислоту (т. е. ионы), то равновесие сместится влево и гидролиз ослабится. Если добавить щелочь (т. е. ионы), катионы будут связываться в молекулы H_2O и равновесие сместится вправо. Гидролиз усилится. Аналогично, если в раствор соли, имеющий щелочную реакцию, добавить щелочь, гидролиз ослабится, а при добавлении кислоты — усилится.

5. В электролите с тремя солями происходит изменение гидролиза солей. Гидролиз хлорида никеля может уменьшаться, а гидролиз хлоридов кобальта и железа увеличиваться.

При электрохимическом осаждении учет всех факторов, влияющих на состав пленок CoFeNi , требует более подробного исследования для получения состава пленок, необходимого в каждом конкретном применении.

Магнитная восприимчивость пленок тройной системы CoFeNi выше, чем пермаллоя. Поэтому тройная система перспективна для применения в преобразователях магнитного поля.

Закключение

Выбор хлоридного электролита с отношением $C_{Ni}/C_{Fe}/C_{Co} = 1/1/1$, разработка технологии приготовления электролита и проведение процесса осаждения пленок CoFeNi при температуре 70 °C позволили подтвердить механизм аномального осаждения вследствие неполной ионизации атомов железа. Отношение $C_{Ni}/C_{Fe}/C_{Co} = 1/1/1$ в пленке достигается при концентрации каждого компонента в электролите 0,006 моль/л. Пленки получаются без механических напряжений, с равномерной структурой и с высокими магнитными параметрами без высокой температуры отжига. Установленное конгруэнтное осаждение при учете заряда ионов в электролите позволяет рассчитывать на воспроизводимое электрохимическое осаждение пленок CoNiFe для применения их в усилителях магнитного поля.

Список литературы

1. Sverdlov Ye., Rosenberg Yu., Rosenberg Yu. I., Zmood R., Erlich R., Natan S., Shacham-Diamand Yo. The electrodeposition of cobalt—nickel—iron high aspect ratio thick film structures for magnetic MEMS applications // *Microelectronic Engineering*. 2004. Vol. 76. P. 258—265.
2. Huang Q., Podlaha E. J. Simulation of Pulsed Electrodeposition for Giant Magnetoresistance FeCoNiCu/Cu Multilayers // *Journal of the Electrochemical Society*. 2004. Vol. 151 (2). P. 119—126.
3. Yoo B. Y., Hernandez S. C., Park D. Y., Myung N. V. Electrodeposition of FeCoNi thin films for magnetic-MEMS devices // *Electrochim. Acta*. 2006. Vol. 51 (28). P. 6346—6352.
4. Ohashi K., Yasue Y., Saito M., Yamada K., Osaka T., Takai M., Hayashi K. Newly developed inductive write head with electroplated CoNiFe thin film // *IEEE Transactions of Magnetics*. 1998. Vol. 34 (4). P. 1432—1434.
5. Liu X., Evans P., and Zangari G. Electrodeposition Co—Fe and Co—Fe—Ni Alloy Films For Magnetic Recording Write Heads // *IEEE Transactions of Magnetics*. 2000. Vol. 36 (5). P. 5410—5415.
6. Perez L., Attenborough K., De Boeck J., Celis J. P., Aroca C., Sánchez P., López E., Sánchez M. C. Magnetic properties of CoNiFe alloys electrodeposited under potential and current control conditions // *J. Magn. Mater.* 2002. Vol. 242—245 (1). P. 163—165.
7. Tobakovic I., Inturi V., Riemer S. Composition, structure, stress, and coercivity of electrodeposited soft magnetic CoNiFe films // *Journal of the Electrochemical Society*. 2002. Vol. 149 (1). P. 18—22.
8. Osaka T., Sawaguchi T., Mizutani F., Yokoshima T., Takai M., and Okinaka Y. Effects of saccharin and thiourea on sulfur inclusion and coercivity of electroplated soft magnetic CoNiFe film // *Journal of The Electrochemical Society*. 1999. Vol. 146 (7). P. 3295—3299.
9. Kim D., Park D. Y., Yoo B. Y., Sumodjo P. T. A., and Myung N. V. Magnetic properties of nanocrystalline iron group thin film alloys electrodeposited from sulfate and chloride baths // *Electrochimica Acta*. 2003. Vol. 48. P. 819—830.
10. Tiffany Y., Jiang W. Effects of additives on magnetic properties of electroplated CoNiFe films // *Master's Theses*, San Jose State University, 2008.
11. Rohan J. F., Ahern B. M., Reynolds K., Crowley S., Healy D. A., Rhen F. M. F., Roy S. Electroless thin film CoNiFe—B alloys for integrated magnetics on Si // *Electrochimica Acta*. 2009. Vol. 54 (6). P. 1851—1856.
12. Sundaram K., Dhanasekaran V., and Mahalingam T. Structural and magnetic properties of high magnetic moment electroplated CoNiFe thin films // *Ionics*. 2011. Vol. 17 (9). P. 835—842.
13. Phua L. X., Phuoc N. N., Ong C. K. Effect of Ni concentration on microstructure, magnetic and microwave properties of electrodeposited NiCoFe films // *Journal of Alloys and Compounds*. 2012. Vol. 543. P. 1—6.
14. Li Jian-mei, Zhang Z., Li Jin-feng, Xue M., Liu Y. Effect of boron/ phosphorus containing additives on electrodeposited CoNiFe soft magnetic thin films // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2013. Vol. 23 (3). P. 674—680.
15. Azizi A., Yourdkhani A., Cutting D., Pesika N. Tuning the Crystal Structure and Magnetic Properties of CoNiFeB Thin Films // *Chemistry of Materials*. 2013. Vol. 25 (12). P. 2510—2514.
16. Валько Н. Г., Гуртовой В. Г. Структура и свойства покрытий Co—Ni—Fe, электролитически осажденных при воздействии рентгеновского излучения // *Физика твердого тела*. 2013. Vol. 55 (11). P. 2086—2089.
17. Kayani Z. N., Riaz S., Naseem Sh. Structural and magnetic properties of FeCoNi thin films // *Indian Journal of Physics*. 2014. Vol. 88 (2). P. 17—23.
18. Kuru C. H., Kockar H., Demirbas O., and Alper M. Characterizations of electrodeposited NiCoFe ternary alloys: Influence of deposition potential // *Journal of Materials Science Materials in Electronics*. 2015. Vol. 26 (6). P. 4046—4050.
19. Yanai T., Shiraishi K., Akiyoshi T., Azuma K., Watanabe Y., Ohgai T., Morimura T., Nakano M., Fukunaga H. Electroplated Fe—Co—Ni films prepared from deep-eutectic-solvent-based plating baths // *AIP Advances*. 2016. Vol. 6. P. 055917.
20. Yanai T., Koda K., Kaji J., Aramaki H., Eguchi K., Takashima K., Nakano M., Fukunaga H. Electroplated Fe—Co—Ni films prepared in ammonium-chloride-based plating baths // *AIP ADVANCES*. 2018. N. 8. P. 056127.
21. Yang Y. Preparation of Fe—Co—Ni ternary alloys with electrodeposition // *Int. J. Electrochem. Sci*. 2015. Vol. 10. P. 5164—5175.
22. Тихонов Р. Д., Черемисинов А. А. Генералов С. С., Горелов Д. В., Поломошнов С. А., Казаков Ю. В. Получение концентраторов магнитного поля с помощью электрохимического осаждения пермаллоя // *Нано- и микросистемная техника*. 2015. № 3. С. 51—57.
23. Тихонов Р. Д., Поломошнов С. А., Горелов Д. В., Казаков Ю. В., Черемисинов А. А. Варьирование магнитных свойств пленок пермаллоя // *Нано- и микросистемная техника*. 2016. № 9. С. 563—568.
24. Amelichev V. V., Polomoshnov S. A., Nikolaeva N. N., Tikhonov R. D., Kupriyanova M. A. Electrochemical Depo-

sition Process for Permalloy Films on Magneto-Semiconductor Microsystems // Pleiades Publishing, Ltd. Semiconductors. 2017. Vol. 51 (13). P. 1707–1708.

25. **Тихонов Р. Д., Черемисинов А. А., Николаева Н. Н.** Пленочная система формирования магнитного поля. Патент РФ № 2636141 на изобретение, 2017.

26. **Тихонов Р. Д.** Магнитный датчик тока с пленочным концентратором // Патент РФ 2656237 на изобретение 2018.

27. **Тихонов Р. Д., Черемисинов А. А.** Намагничивание пленок пермаллоя // Микроэлектроника. 2017. Т. 46 (2). С. 104–113. Tikhonov R. D., Cheremisinov A. A. Magnetization of Permalloy Films // Russian Microelectronics, © Pleiades Publishing, Ltd. 2017. Vol. 46 (2). P. 95–104.

28. **Tikhonov R. D.** Magnetic properties of permalloy films deposited electrochemically by the Tikhonov method // British Open Journal of Chemical Sciences. 2018. Vol. 2 (2). P. 1–10. Available online at <http://borpub.com/Journals.php>.

29. **Тихонов Р. Д., Поломошнов С. А., Черемисинов А. А., Горелов Д. В.** Пленочные концентраторы магнитного поля на основе пермаллоя // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 8. С. 477–488.

30. **Коровин Н. В.** Общая химия. М.: Высшая школа, 1998. 559 с.

31. <https://himya.ru/konstanta-gidroliza-tablicy-elektronogo-spravochnika-po-ximii-soderzhashhie-konstanta-gidroliza.html>

R. D. Tikhonov, Ph. D., Professor, Senior Researcher, e-mail: R.Tikhonov@tcen.ru,
A. A. Cheremisinov, Ph. D., Head of Department, **D. V. Gorelov**, Junior Researcher,
Iu. V. Kasakov, Junior Researcher,
Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre", Moscow, Zelenograd,
124498, Russian Federation

Corresponding author:

Tikhonov Robert D., Ph. D., Professor, Senior Researcher, Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre", Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation, e-mail: R.Tikhonov@tcen.ru

The Magnetic Properties of the Co—Ni—Fe Films were Obtained by Electrochemical Deposition by Tikhonov's Method

Received on December 17, 2019

Accepted on December 30, 2019

Figuring out the nature of the phenomena occurring in the electrolyte for electrochemical deposition of CoNiFe films and leading to a difference in the relative content of the elements in the electrolyte and in the film was carried out with the help of spectrophotometric study of chloride electrolytes and electrochemical deposition of CoNiFe films at 70 °C. An experimental study of absorption spectrums and hydrogen pH of CoCl₂, NiCl₂ and FeCl₂ salt solutions at concentrations of 0.005 to 1 mol/l shows the complex nature of ion balance formation in single and mixed solutions and its dependence on acid and alkaline additives. CoNiFe film deposition was carried out of a chloride electrolyte with a component content ratio of 1:1:1 at a large 0.48 mol/l and a low concentration of 0.006 mol/l. The content of the component in the film at electrochemical deposition of the three component solution CoCl₂, NiCl₂, FeCl₂ with equal concentration of each component does not correspond to the composition of the electrolyte. The closest to the composition of the electrolyte is the composition of the film when the CoNiFe films are deposited in the electrolyte with the concentration of each component 0.006 mol/l. Magnetic susceptibility of the films of the triple CoNiFe system is higher than the permalloy. Therefore, the triple system is promising for use in magnetic field converters.

Keywords: CoNiFe films, chloride electrolyte, ion balance, spectrophotometric control, electrochemical deposition, magnetization of films.

For citation:

Tikhonov R. D., Cheremisinov A. A., Gorelov D. V., Kasakov Iu. V. The Magnetic Properties of the Co—Ni—Fe Films were obtained by Electrochemical Deposition by Tikhonov's Method, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 123–135.

DOI: 10.17587/nmst.22.123-135

References

1. Sverdlov Ye., Rosenberg Yu., Rosenberg Yu. I., Zmood R., Erlich R., Natan S., Shacham-Diamand Yo. The electrodeposition of cobalt–nickel–iron high aspect ratio thick film structures for magnetic MEMS applications, *Microelectronic Engineering*, 2004, vol. 76, pp. 258–265.
2. Huang Q. and Podlaha E. J. Simulation of Pulsed Electrodeposition for Giant Magnetoresistance FeCoNiCu/Cu Multilayers, *Journal of the Electrochemical Society*, 2004, vol. 151 (2), pp. 119–126.
3. Yoo B. Y., Hernandez S. C., Park D. Y., Myung N. V. Electrodeposition of FeCoNi thin films for magnetic-MEMS devices, *Electrochim. Acta*, 2006, vol. 51 (28), pp. 6346–6352.
4. Ohashi K., Yasue Y., Saito M., Yamada K., Osaka T., Takai M., Hayashi K. Newly developed inductive write head with electroplated CoNiFe thin film, *IEEE Transactions of Magnetics*, 1998, vol. 34 (4), pp. 1432–1434.
5. Liu X., Evans P., Zangari G. Electrodeposition Co–Fe and Co–Fe–Ni Alloy Films For Magnetic Recording Write Heads, *IEEE Transactions of Magnetics*, 2000, vol. 36 (5), pp. 5410–5415.
6. Perez L., Attenborough K., De Boeck J., Celis J. P., Aroca C., Sánchez P., López E., Sánchez M. C. Magnetic properties of CoNiFe alloys electrodeposited under potential and current control conditions, *J. Magn. Magn. Mater.*, 2002, vol. 242–245 (1), pp. 163–165.
7. Tobakovic I., Inturi V., Riemer S. Composition, structure, stress, and coercivity of electrodeposited soft magnetic CoNiFe films, *Journal of the Electrochemical Society*, 2002, 149 (1), pp. 18–22.
8. Osaka T., Sawaguchi T., Mizutani F., Yokoshima T., Takai M., Okinaka Y. Effects of saccharin and thiourea on sulfur inclusion and coercivity of electroplated soft magnetic CoNiFe film, *Journal of The Electrochemical Society*, 1999, vol. 146 (7), pp. 3295–3299.
9. Kim D., Park D. Y., Yoo B. Y., Sumodjo P. T. A., Myung N. V. Magnetic properties of nanocrystalline iron group thin film alloys electrodeposited from sulfate and chloride baths, *Electrochimica Acta*, 2003, vol. 48, pp. 819–830.
10. Tiffany Yun, Wen Jiang Effects of additives on magnetic properties of electroplated CoNiFe films, Master's Thesis, San Jose State University, 2008.
11. Rohan J. F., Ahern B. M., Reynolds K., Crowley S., Healy D. A., Rhen F. M. F., Roy S. Electroless thin film CoNiFe–B alloys for integrated magnetics on Si, *Electrochimica Acta*, 2009, vol. 54 (6), pp. 1851–1856.
12. Sundaram K., Dhanasekaran V., Mahalingam T. Structural and magnetic properties of high magnetic moment electroplated CoNiFe thin films, *Ionics*, 2011, vol. 17 (9), pp. 835–842.
13. Phua L. X., Phuoc N. N., Ong C. K. Effect of Ni concentration on microstructure, magnetic and microwave properties of electrodeposited NiCoFe films, *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, vol. 543, pp. 1–6.
14. Li Jian-mei, Zhang Z., Li Jin-feng, Xue M., Liu Y. Effect of boron/ phosphorus containing additives on electrodeposited CoNiFe soft magnetic thin films, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, vol. 23 (3), pp. 674–680.
15. Azizi A., Yourdkhani A., Cutting D., Pesika N. Tuning the Crystal Structure and Magnetic Properties of CoNiFeB Thin Films, *Chemistry of Materials*, 2013, vol. 25 (12), pp. 2510–2514.
16. Val'ko N. G., Gurtovoj V. G. Struktura i svojstva pokrytij Co–Ni–Fe, elektroliticheski osazhdennyh pri vozdejstvii rentgenovskogo izlucheniya, *Fizika tverdogo tela*, 2013, vol. 55, no. 11, pp. 2086–2089 (in Russian).
17. Kayani Z. N., Riaz S., Naseem Sh. Structural and magnetic properties of FeCoNi thin films, *Indian Journal of Physics*, 2014, vol. 88 (2), pp. 17–23.
18. Kuru C. H., Kockar H., Demirbas O., Alper M. Characterizations of electrodeposited NiCoFe ternary alloys: Influence of deposition potential, *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 2015, vol. 26 (6), pp. 4046–4050.
19. Yanai T., Shiraiishi K., Akiyoshi T., Azuma K., Watanabe Y., Ohgai T., Morimura T., Nakano M., and Fukunaga H. Electroplated Fe–Co–Ni films prepared from deep-eutectic-solvent-based plating baths, *AIP Advances*, vol. 2016, 6: 055917.
20. Yanai T., Koda K., Kaji J., Aramaki H., Eguchi K., Takashima K., Nakano M., Fukunaga H. Electroplated Fe–Co–Ni films prepared in ammonium-chloride-based plating baths, *AIP Advances*, 2018, vol. 8, pp. 056127.
21. Yang Y. Preparation of Fe–Co–Ni ternary alloys with electrodeposition, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2015, vol. 10, pp. 5164–5175.
22. Tihonov R. D., Cheremisinov A. A. Generalov S. S., Gorelov D. V., Polomoshnov S. A., Kazakov Yu. V. Poluchenie konzentrorov magnitnogo polya s pomoshch'yu elektrohimičeskogo osazhdeniya permalloya, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2015, no. 3, pp. 51–57 (in Russian).
23. Tihonov R. D., Polomoshnov S. A., Gorelov D. V., Kazakov Yu. V., Cheremisinov A. A. Var'irovanie magnitnyh svojstv plenok permalloya, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 9, pp. 563–568 (in Russian).
24. Amelichev V. V., Polomoshnov S. A., Nikolaeva N. N., Tikhonov R. D., Kupriyanova M. A. Electrochemical Deposition Process for Permalloy Films on Magneto-Semiconductor Microsystems, *Semiconductors*, 2017, vol. 51 (13), pp. 1707–1708.
25. Tihonov R. D., Cheremisinov A. A., Nikolaeva N. N. Plenochnaya sistema formirovaniya magnitnogo polya. Patent RF № 2636141 na izobretenie.2017 (in Russian).
26. Tihonov R. D. Magnitnyj datchik toka s plenochnym konzentrorom. Patent RF 2656237 na izobretenie 2018 (in Russian).
27. Tikhonov R. D., Cheremisinov A. A. Magnetization of Permalloy Films, *Russian Microelectronics*, 2017, vol. 46, no. 2, pp. 95–104.
28. Tikhonov R. D. Magnetic properties of permalloy films deposited electrochemically by the Tikhonov method, *British Open Journal of Chemical Sciences*, 2018, vol. 2 (2), pp. 1–10, available online at: <http://borpub.com/Journals.php>.
29. Tikhonov R. D., Polomoshnov S. A., Cheremisinov A. A., Gorelov D. V. Plenochnye konzentratory magnitnogo polya na osnove permalloya, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 8, pp. 477–488 (in Russian).
30. Korovin N. V. *Obshchaya himiya*. Moscow, Vysshaya shkola, 1998, 559 p. (in Russian).
31. <https://himya.ru/konstanta-gidroliza-tablicy-elektronogo-spravochnika-po-ximii-soderzhashhie-konstanta-gidroliza.html>

С. В. Булярский¹, д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотр., **В. С. Белов**^{1,2}, мл. науч. сотр., **К. И. Литвинова**¹, мл. науч. сотр., **Е. А. Першина**^{1,3}, науч. сотр., **Д. А. Коива**^{1,2}, мл. науч. сотр., **М. В. Шибалов**¹, мл. науч. сотр., **Е. Р. Тимофеева**¹, мл. науч. сотр., **А. П. Орлов**^{1,4}, науч. сотр.

¹ Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (ИНМЭ РАН), Москва,

² Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Зеленоград

³ Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка

⁴ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

ОКСИД ГАФНИЯ В ТУННЕЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ НИКЕЛЬ — ДИЭЛЕКТРИК — АЛЮМИНИЙ

Поступила в редакцию 10.12.2019

Разработана технология получения пленок оксида гафния толщиной менее 11 нм и продемонстрированы высокие качества этого материала для создания туннельно-прозрачных диэлектриков. На основе оксида гафния разработаны туннельные диоды Ni—HfO_x—Al, электрические характеристики которых хорошо описываются теорией туннелирования структур металл — диэлектрик — металл.

Ключевые слова: атомно-слоевое осаждение, оксид гафния, туннельные диоды, Оже-электронная спектроскопия

Введение

Структуры металл — диэлектрик — металл (МДМ) имеют выпрямляющий характер и могут быть использованы в нанoeлектронике в самых различных направлениях. В первую очередь, эти структуры важны с точки зрения распространения и регистрации плазмонных волн [1]. Эти устройства в качестве приложений применяют в новых приборах, использующих наноразмерные оптические явления, транспортировку и хранение энергии, в фотоэлектрических солнечных батареях [2—6]. На структурах МДМ создают твердотельные лазеры [7], мемристоры [8—10] и элементы магнитной памяти [11—12].

Оксид гафния (HfO₂) является потенциальным конкурентом среди других диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью, таких как барий титанат стронция, титанат циркония и т. д. Благоприятными факторами применения этого материала являются: широкая запрещенная зона, высокий показатель преломления, большая диэлектрическая проницаемость и лучшая химическая стабильность. Кроме того, технология этого материала имеет превосходную совместимость процесса с параллельной планарной технологией интегральных схем [13—15].

Использование оксида гафния в радиочастотном емкостном MEMS-переключателе значительно улучшает быстродействие приборов благодаря большой емкости в закрытом состоянии и малым токам утечки, что приводит к лучшей

изоляции, высокому коэффициенту емкости, а также уменьшению в размерах [16]. Емкостный переключатель с использованием оксида гафния имеет лучшие показатели, чем при использовании оксида кремния. Различные исследовательские группы сообщали о свойствах оксида гафния [16—18]. Тем не менее подробная информация о микроструктуре и морфология пленки HfO₂ недостаточно изучены для радиочастотных MEMS-устройств. Поэтому важно продолжить эти исследования.

В данной работе исследуются свойства оксида гафния, синтезированного методом атомно-слоевого осаждения, и МДМ-структуры на его основе.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Атомно-слоевое осаждение пленок оксида гафния проводили в модуле FlexAL ALD System английской фирмы *Oxford Instruments*. Тонкие пленки никеля и алюминия наносили методом электронно-лучевого напыления. Для формирования МДМ-структуры использовали фотолитографию. Исследования пленки оксида гафния толщиной около 38 нм проводили методами просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения на микроскопе Jeol JEM-2100Plus (рис. 1, см. вторую сторону обложки). Исследования показали, что полученная пленка оксида гафния является полностью поликристаллической,

кристаллиты имеют средний размер 5...10 нм. У наблюдаемых кристаллов нет выделенной ориентации, на что указывает разное направление кристаллических плоскостей соседних кристаллитов. Поликристаллическая структура пленки обуславливается процессами адсорбции, которые в данном случае могут происходить при атомно-слоевом осаждении. В МДМ-структуре толщина оксида гафния меньше, составляет 10...11 нм, поэтому пленка может быть как аморфной, так и кристаллической с меньшим размером кристаллитов [19].

Исследования методом Оже-электронной спектроскопии, проведенные на спектрометре Jeol JAMP-9510F, показали, что стехиометрия соединения оксида гафния близка к HfO_2 , при обработке ОЭС-пиков гафния методом факторного анализа [20, 21] не было обнаружено пиков гафния, относящихся к металлической фазе. Несоответствие стехиометрии по кислороду на ОЭС-профиле (рис. 2, см. вторую сторону обложки) распределения по глубине может быть связано как с преимущественным распылением атомов кислорода в структуре HfO_2 [22], с наличием в слое оксида гафния ОЭС-пиков никеля и алюминия вследствие эффекта перемешивания в процессе ионного распыления, что ухудшает разрешение метода ОЭС по глубине и может изменять расчетную стехиометрию при использовании модели гомогенного распределения, так и с несоответствием слоя стехиометрии HfO_2 . На границе раздела алюминий—оксид гафния обнаружен слой оксида алюминия, образовавшийся в результате окисления алюминия от оксида гафния.

Вольт-амперные характеристики структуры $\text{Ni—HfO}_x\text{—Al}$ (рис. 3) свидетельствовали о наличии потенциального барьера и носили нелинейный характер. Модель структуры металл — диэлектрик — металл, которая поясняет механизм выпрямления, представлена на вставке рис. 3.

Согласно данной модели ток определяется вероятностями туннелирования электронов слева направо и справа налево:

$$j = j_{LR} - j_{RL} = \frac{2e}{h} \int dE [f_R(E) - f_L(E - eU)] \int \frac{d^2k}{4\pi^2} D(E, k), \quad (1)$$

где j_{LR} — ток барьера слева направо; j_{RL} — ток барьера справа налево; $f_R(E)$ — функция распределения Ферми—Дирака, характеризующая заполнение электронов справа от диэлектрика; $f_L(E)$ — вероятность заполнения электронных

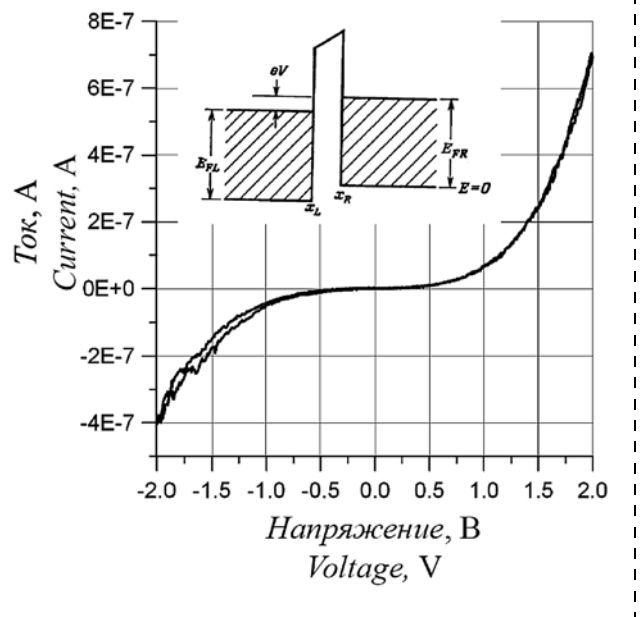


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика структуры $\text{Ni—HfO}_x\text{—Al}$. На вставке модель контакта

состояний слева от диэлектрика; $D(E, k)$ — вероятность туннельного перехода; h — постоянная Планка; e — заряд электрона; U — напряжение, приложенное к контакту; k — волновое число электрона в направлении туннелирования; E — текущее значение энергии.

В работах [23, 24] было учтено действие сил зеркального изображения, когда вольт-амперная характеристика (1) принимает следующий вид:

$$j = j_0 \{ \varphi \exp(-A\varphi^{1/2}) - (\varphi = eU) \exp[-A(\varphi = eU)^{1/2}] \}. \quad (2)$$

Здесь j_0 — ток насыщения; φ — среднее значение потенциала барьера; U — приложенное напряжение; e — заряд электрона; A — коэффициент пропорциональности;

$$j_0 = e/2\pi h (\beta \Delta S)^2; \quad A = 4\pi \beta \Delta S (2m)^{1/2} / h, \quad (3)$$

где $\Delta S = S_2 - S_1$ — ширина барьера на уровне Ферми; β — функция, которая зависит от формы барьера, равная ~ 1 .

Эта зависимость предсказывает, что вольт-амперная характеристика будет линейна в координатах $\ln(j) \approx f(\sqrt{V})$, что согласуется с экспериментальными результатами для структуры $\text{Ni—HfO}_x\text{—Al}$ (рис. 4).

Проводимость вблизи нулевого напряжения изменяется по параболе (рис. 4, вставка), что также говорит в пользу туннельной модели структуры, которая изучается. Расчеты показали, что

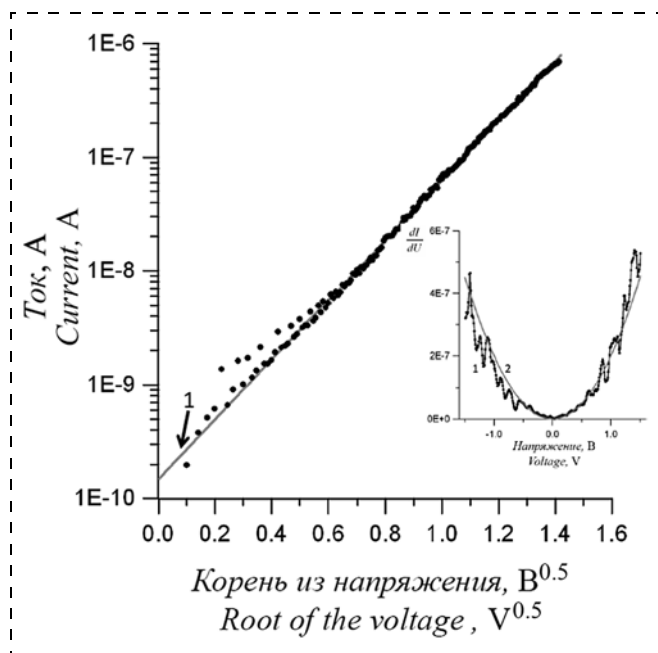


Рис. 4. Зависимость тока структуры Ni—HfO_x—Al от корня из напряжения. На вставке изменение проводимости структуры вблизи нуля напряжения

эффективная толщина диэлектрика с учетом сил зеркального изображения равна ~7 нм, что хорошо согласуется с полученной методом просвечивающей электронной микроскопии — 10 нм.

Заключение

Таким образом, оксид гафния, полученный методом атомно-слоевого осаждения, продемонстрировал высокие диэлектрические качества. Созданы туннельно-прозрачные структуры на оксиде гафния, которые в перспективе можно использовать для создания ректенн.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшей школы, проект № 0004-2019-0003.

Список литературы

1. **Katyal J., Soni R. K.** Localized Surface Plasmon Resonance and Refractive Index Sensitivity of Metal—Dielectric—Metal Multilayered Nanostructures // *Plasmonics*. 2014. Vol. 9. P. 1171—1181.
2. **Willems K. A., Van Duyne R. P.** Localized surface Plasmon resonance spectroscopy and sensing. // *Annu Rev Phys Chem*. 2007. Vol. 58. P. 267—297.
3. **Ozbay E.** Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions. // *Science*. 2006. Vol. 331. P. 189—193.
4. **Maier S. A., Kik P. G., Atwater H. A., Meltzer S., Harel E., Koel B. E., Requicha A. A.** Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in

metal nanoparticle Plasmon waveguides // *Nat. Mater*. 2003. Vol. 2. P. 229—232.

5. **Maier S. A., Atwater H. A.** Plasmonics: localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric structures // *J. Appl. Phys*. 2005. Vol. 98. P. 011101.

6. **Seifouri M., Sharaf R.** Symmetric metal nanogratings and horned shape extended pads to enhance light transmission of plasmonic metal-semiconductor-metal photodetector // *Opt. Quant. Electron*. 2017. Vol. 49, N. 136. P. 1—21.

7. **Tian J., Liang X., Zhang Y., Li H.** Mode analysis of surface plasmon metal-dielectric-metal nanowire array waveguide at sub-wavelength scale // *Eur. Phys. J. D*. 2013. Vol. 67, N. 103. P. 1—5.

8. **Waser R., Aono M.** Nanoionics-based resistive switching memories // *Nature Materials*. 2007. N. 6. P. 833—840.

9. **Pershin Y., Fontain S.** Memristive model of amoeba's learning // *Phys. Rev. E*. 2009. Vol. 80. P. 1286—1292.

10. **Yang J., Pickett M. D., Li X.** et al. Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices // *Nat. Nanotechnol*. 2008. Vol. 3. P. 429—433.

11. **Socolovsky L. M., Denardin J. C., Brandl A. L., Knobler M.** Magnetotransport, magnetic, and structural properties of TM—SiO₂ (TM = Fe, Co, Ni) granular alloys // *Mater. Charact*. 2003. Vol. 50. P. 117—121.

12. **Wang C. Z., Zhang P., Zheng L., Xiao X., Rong Y.** Influence of annealing on microstructure and magnetic-transport of FeCo—Al₂O₃ nanogranular films // *Thin Solid Films*. 2008. Vol. 516. P. 3422—3430.

13. **Vargas M., Murphy N. R., Ramana C. V.** Structure and optical properties of nanocrystalline hafnium oxide thin films // *Optical Materials*. 2014. Vol. 37. P. 621—628.

14. **Kamala Bharathi K., Kalidindi N. R., Ramana C. V.** Grain size and strain effects on the optical and electrical properties of hafnium oxide nanocrystalline thin films // *Journal of Applied Physics*. 2010. Vol. 108, N. 8. P. 83529.

15. **Cantas A., Aygun G., Turan R.** Impact of incorporated oxygen quantity on optical, structural and dielectric properties of reactive magnetron sputter grown high-κ HfO₂/Hf/Si thin film // *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 318. P. 199—205.

16. **Srivastava A., Nahar R. K., Sarkar C. K.** Study of the effect of thermal annealing on high k hafnium oxide thin film structure and electrical properties of MOS and MIM devices // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2011. Vol. 22, N. 7. P. 882—889.

17. **Zhang Y., Onodera K., Maeda R.** RF Micro-Electro-Mechanical Systems Capacitive Switches Using Ultra Thin Hafnium Oxide Dielectric // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2006. Vol. 45, N. 1A. P. 300—304.

18. **Tsaur J., Onodera K., Kobayashi T., Wang Z.-J., et al.** Broadband MEMS shunt switches using PZT/HfO₂ multi-layered high k dielectrics for high switching isolation // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2005. Vol. 121. N. 1. P. 275—281.

19. **Искандарова И. М., Книжник А. А., Белов И. В.** и др. Моделирование шероховатости тонких пленок, полученных методом атомного осаждения слоев // *Химическая физика*. 2007. Т. 26, № 3. С. 79—89.

20. **Hall P. M., Morabito J. M.** Relative Sensitivity Factors for Quantitative Auger Analysis of Binary Alloys. // *Surface Science*. 1977. N. 62. P. 1—20.

21. **Белов В. С., Литвинова К. И., Тагаченков А. М., Сиротина А. П., Кириленко Е. П., Молоденский М. С., Шибалов М. В., Зенова Е. В., Першина Е. А.** Определенные изменения работы выхода углеродных нанотрубок

методом Оже-электронной спектроскопии после нанесения тонкого слоя оксида гафния // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 8. С. 465—471.

22. **Hofmann S., Sanz J. M.** Quantitative XPS analysis of the Surface Layer of Anodic Oxides Obtained during Depth Profiling by Sputtering with 3 keV Ar⁺ ions // Journal of Trace and Microprobe Techniques. 1982. Vol. 1. P. 213—264.

23. **Роуэлл Д. М.** Туннельные аномалии. // Туннельные явления в твердых телах / Под ред. Э. Бурштейн, С. Лундквист. Пер. с англ. М.: Мир, 1973. P. 369—386.

24. **Симмонс Д. Г.** Силы изображения в туннельных переходах металл — окисел — металл. // Туннельные явления в твердых телах / Под ред. Э. Бурштейн, С. Лундквист. Пер. с англ. М.: Мир, 1973.

S. V. Bulyarsky¹, D. Sc., Senior Researcher, e-mail: bulyar2954@mail.ru,
V. S. Belov^{1,2}, Junior Researcher, **K. I. Litvinova¹**, Junior Researcher, **E. A. Pershina^{1,3}**, Researcher,
D. A. Koiva^{1,2}, Junior Researcher, **M. V. Shibalov¹**, Junior Researcher,
E. R. Timofeeva¹, Junior Researcher, **A. P. Orlov^{1,4}**, Researcher,

¹ Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (INME RAS), Moscow

² National Research University "MIET", Zelenograd,

³ Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka,

⁴ Institute of Radio Engineering and Electronics. V. A. Kotelnikova RAS, Moscow, Russia

Corresponding author:

Bulyarskiy Sergey V., D. Sc., Senior Researcher, Institute of Nanotechnology Microelectronics RAS, Moscow, Russian Federation. E-mail: bulyar2954@mail.ru

Hafnium Oxide In Tunneling Structures Nickel — Dielectric — Aluminum

Received on December 10, 2019

Accepted on December 24, 2019

In this work, we developed a technology for producing hafnium oxide films with a thickness of less than 11 nm and demonstrated the high quality of this material to create tunnel-transparent dielectrics. Based on hafnium oxide, Ni—HfO_x—Al tunneling diodes have been developed, the electrical characteristics of which are well described by the theory of tunneling of metal-insulator-metal structures.

Keywords: atomic layer deposition, hafnium oxide, tunnel diodes

For citation:

Bulyarskiy S. V., Belov V. S., Litvinova K. I., Pershina E. A., Koiva D. A., Shibalov M. V., Timofeeva E. R., Orlov A. P. Hafnium Oxide in Tunneling Structures Nickel — Dielectric — Aluminum, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 136—140.

DOI: 10.17587/nmst.22.136-140

References

1. **Katyal J., Soni R. K.** Localized Surface Plasmon Resonance and Refractive Index Sensitivity of Metal—Dielectric—Metal Multilayered Nanostructures, *Plasmonics*, 2014, vol. 9, pp. 1171—1181.

2. **Willems K. A., Van Duyn R. P.** Localized surface Plasmon resonance spectroscopy and sensing, *Annu Rev. Phys. Chem.*, 2007, vol. 58, pp. 267—297.

3. **Ozbay E.** Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions, *Science*, 2006, vol. 331, pp. 189—193.

4. **Maier S. A., Kik P. G., Atwater H. A., Meltzer S., Harel E., Koel B. E., Requicha A. A.** Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in metal nanoparticle Plasmon waveguides, *Nat. Mater.*, 2003, vol. 2, pp. 229—232.

5. **Maier S. A., Atwater H. A.** Plasmonics: localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric structures, *J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 98, p. 011101.

6. **Seifouri M., Sharaf R.** Symmetric metal nanogratings and horned shape extended pads to enhance light transmission of plasmonic metal-semiconductor-metal photodetector, *Opt. Quant Electron*, 2017, vol. 49, no. 136, pp. 1—21.

7. **Tian J., Liang X., Zhang Y., Li H.** Mode analysis of surface plasmon metal-dielectric-metal nanowire array waveguide at sub-wavelength scale, *Eur. Phys. J. D.*, 2013, vol. 67, no. 103, pp. 1—5.

8. **Waser R., Aono M.** Nanoionics-based resistive switching memories, *Nature Materials*, 2007, no. 6, pp. 833—840.

9. **Pershin Y., Fontain S.** Memristive model of amoeba's learning, *Phys. Rev.*, 2009, vol. 80, pp. 1286—1292.

10. **Yang J., Pickett M. D., Li X.** et al. Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices, *Nat. Nanotechnol.*, 2008, vol. 3, pp. 429—433.

11. **Socolovsky, L. M., Denardin J. C., Brandl A. L., Knobel M.** Magnetotransport, magnetic, and structural properties of TM—SiO₂ (TM = Fe, Co, Ni) granular alloys, *Mater. Charact.*, 2003, vol. 50, pp. 117—121.

12. Wang C. Z., Zhang P., Zheng L., Xiao X., Rong Y. Influence of annealing on microstructure and magnetic-transport of FeCo—Al₂O₃ nanogranular films, *Thin Solid Films*, 2008, vol. 516, pp. 3422—3430.
13. Vargas M., Murphy N. R., Ramana C. V. Structure and optical properties of nanocrystalline hafnium oxide thin films, *Optical Materials*, 2014, vol. 37, pp. 621—628.
14. Kamala Bharathi K., Kalidindi N. R., Ramana C. V. Grain size and strain effects on the optical and electrical properties of hafnium oxide nanocrystalline thin films, *Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 108, no. 8, p. 83529.
15. Cantas A., Aygun G., Turan R. Impact of incorporated oxygen quantity on optical, structural and dielectric properties of reactive magnetron sputter grown high- κ HfO₂/Hf/Si thin film, *Applied Surface Science*, 2014, vol. 318, pp. 199—205.
16. Srivastava A., Nahar R. K., Sarkar C. K. Study of the effect of thermal annealing on high κ hafnium oxide thin film structure and electrical properties of MOS and MIM devices, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2011, vol. 22, no. 7, pp. 882—889.
17. Zhang Y., Onodera K., Maeda R. RF Micro-Electro-Mechanical Systems Capacitive Switches Using Ultra Thin Hafnium Oxide Dielectric, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 45, no. 1A, pp. 300—304.
18. Tsaor J., Onodera K., Kobayashi T., Wang Z.-J., et al. Broadband MEMS shunt switches using PZT/HfO₂ multi-layered high κ dielectrics for high switching isolation, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, vol. 121, no. 1, pp. 275—281.
19. Iskandarova I. M., Knijnik A. A., Belov I. V. et al. Modelirivaniye sherohovatosti tonkih plenok, poluchennykh metodom atomno sloevogo osagdeniya, *Himicheskaz fizika*, 2007, vol. 26, no. 3, pp. 79—89.
20. Hall P. M., Morabito J. M. Relative Sensitivity Factors for Quantitative Auger Analysis of Binary Alloys, *Surface Science*, 1977, no. 62, pp. 1—20.
21. Belov V. S., Litvinova K. I., Tagachenkov A. M., Sirotina A. P., Kirilenko E. P., Molodensky M. S., Shibailov M. V., Pershina E. A., Zenova E. V. Determination of changes in workfunction of carbon nanotubes by Auger electron spectroscopy after deposition of thin hafnium oxide by ALD, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 8, pp. 465—471.
22. Hofmann S., Sanz J. M. Quantitative XPS analysis of the Surface Layer of Anodic Oxides Obtained during Depth Profiling by Sputtering with 3 keV Ar⁺ ions, *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, 1982, vol. 1, pp. 213—264.
23. Rouell D. M. Tunnel'nyye anomalii, *Tunnel'nyye yavleniya v tverdykh telakh*, Ed. E. Burshteyn, S. Lundkvist, Moscow: Mir, 1973, pp. 369—386.
24. Simmons D. G. Sily izobrazheniya v tunnel'nykh perekhodakh metall — okisel -metall, *Tunnel'nyye yavleniya v tverdykh telakh*, Ed. E. Burshteyn, S. Lundkvist, Moscow: Mir, 1973.

УДК 537.87

DOI: 10.17587/nmst.22.140-147

А. Н. Волобуев, д-р техн. наук, проф., e-mail: volobuev47@yandex.ru
Самарский государственный медицинский университет

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ И МЕТАМАТЕРИАЛА С КИРАЛЬНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ ИНДУКТИВНОГО ТИПА

Поступила в редакцию 10.01.2020

Представлен принцип расчета пластинки из метаматериала с киральными включениями индуктивного типа. Показано, что распространение электромагнитной волны в таком веществе можно исследовать с помощью введения параметра киральности и на основе детального метода расчета. Из сравнения двух методов найдена зависимость параметра киральности от частоты падающего на пластинку электромагнитного излучения. С помощью детального метода найдено нелинейное дифференциальное уравнение для потенциала на киральной пластинке. Показано, что это уравнение имеет решения в виде бегущих уединенных и стоячих волн, но не бегущих синусоидальных волн. Проведен анализ полученных решений нелинейного уравнения, графически показан переход от многоволнового решения к решению в виде стоячих волн при уменьшении расстояния между киральными элементами.

Ключевые слова: метаматериал, параметр киральности, индуктивные включения, многоволновое решение, стоячая волна

Введение

В настоящее время метаматериалы (греч. "meta" вне, за пределами), т.е. композитные материалы с различными включениями, распределенными как хаотически, так и периодически, широко применяют, в частности, в радиотехни-

ке, при конструировании космических аппаратов, в медицине и т. д. [1—4]. Благодаря этим включениям полученные материалы имеют многие полезные физические, электрические, оптические и другие свойства, которых нет у природных веществ. Среди метаматериалов выделяются

вещества с киральными свойствами [5], которые способны вращать плоскость поляризации электромагнитных волн. В оптике аналогом подобных веществ служат оптически активные вещества, например кварц, раствор глюкозы и др.

Однако методы расчета метаматериалов довольно ограничены [6]. В основном все расчеты базируются на решении уравнений Максвелла и подобранных в соответствии с задачей материальных уравнений.

Существующий подход имеет ограничения, так как обычно используются только осредненные характеристики метаматериалов, например параметр киральности.

В настоящей работе сделана попытка более детального подхода к свойствам киральных включений метаматериалов, проведен анализ влияния этих свойств на взаимодействие киральных элементов с электромагнитной волной, падающей на пластинку из метаматериала.

1. Стандартный метод расчета взаимодействия метаматериала с электромагнитной волной

При исследовании метаматериалов с киральными включениями на основе уравнений Максвелла обычно используют материальные уравнения, включающие так называемый параметр киральности χ . В работе [7] предложены материальные уравнения в следующем виде:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_a \mathbf{E} \mp i \frac{\chi}{V} \mathbf{H}; \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \mu_a \mathbf{H} \pm i \frac{\chi}{V} \mathbf{E}, \quad (2)$$

где \mathbf{D} и \mathbf{B} — индукции электрического и магнитного полей в электромагнитной волне, распространяющейся в киральной среде; \mathbf{E} и \mathbf{H} — напряженности электрической и магнитной составляющей волны; ε_a и μ_a — абсолютные электрическая и магнитная проницаемости киральной среды; V — скорость электромагнитной волны в киральной среде; χ — параметр киральности, в данном случае безразмерная величина.

В работе [7] показано, что материальные уравнения (1) и (2) можно записать в более простом виде:

$$\mathbf{D} = (1 \pm \chi) \varepsilon_a \mathbf{E}; \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = (1 \pm \chi) \mu_a \mathbf{H}. \quad (4)$$

В формулах (1)–(4) верхние знаки относятся к правовращающему киральному элементу, нижние — к левовращающему.

Используя (3) и (4), можно показать [7], что если киральная среда обладает только реактивными сопротивлениями, электромагнитная волна в ней подчиняется волновым уравнениям:

$$\Delta \mathbf{D} = \left(\frac{1 \pm \chi}{V} \right)^2 \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial t^2}; \quad (5)$$

$$\Delta \mathbf{B} = \left(\frac{1 \pm \chi}{V} \right)^2 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}, \quad (6)$$

где t — время.

В дальнейшем нас будет интересовать только уравнение (5). Подставляя (3) в (5) и переходя к скалярному потенциалу φ [8], найдем:

$$\Delta \varphi = \left(\frac{1 \pm \chi}{V} \right)^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}. \quad (7)$$

Будем искать решение уравнения (7) в виде:

$$\varphi - \varphi_0 = \varphi(\mathbf{r}) \exp(i\omega t), \quad (8)$$

где φ_0 — начальный уровень отсчета потенциала; \mathbf{r} — совокупность пространственных координат; ω — циклическая частота падающей электромагнитной волны.

Подставляя (8) в (7), имеем:

$$\Delta \varphi(\mathbf{r}) + (1 \pm \chi)^2 k^2 \varphi(\mathbf{r}) = 0, \quad (9)$$

где $k = \frac{\omega}{V}$ — модуль волнового вектора электромагнитной волны.

Решая уравнение (9), с использованием начальных и граничных условий можно исследовать процессы отражения, преломления, дифракции электромагнитной волны в метаматериале.

2. Детальный метод расчета взаимодействия метаматериала с электромагнитной волной

Рассмотрим пластинку из метаматериала с киральными включениями индуктивного типа, состоящую из диэлектрика с включениями токопроводящих киральных элементов в виде спиралей, ось которых направлена поперек пластинки. Киральные элементы распределены периодически.

На рис. 1 показано облучение пластинки электромагнитной волной. Предполагаем, что киральные включения не имеют активного сопротивления. Киральный элемент полностью пронизывает пластинку.

Особенностью пластинки является распределенная по ее поверхностям емкость при точеч-

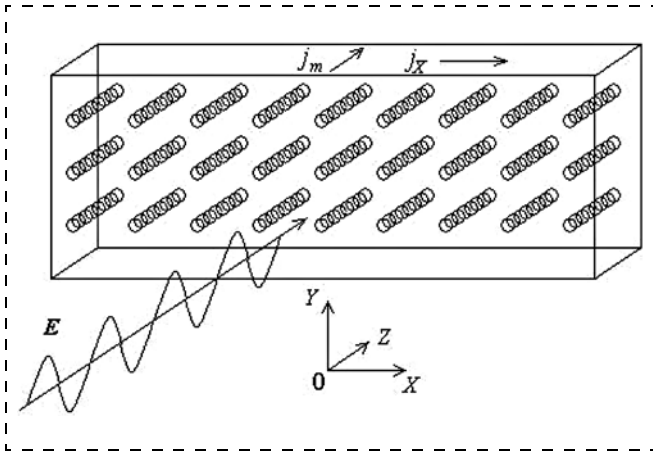


Рис. 1. Пластика из метаматериала, облучаемая электромагнитной волной

ных индуктивных включениях. Поэтому рассматривать взаимодействие отдельного кирального элемента, имеющего индуктивность и емкость, с электромагнитной волной некорректно.

При облучении на пластинке возникает разность потенциалов, подчиняющаяся уравнению (7). Плотность тока через пластинку будет иметь вид:

$$j_m = C_m \frac{\partial \varphi}{\partial t} + (\varphi - \varphi_0) g_m, \quad (10)$$

где C_m — емкость единицы площади пластинки; φ — потенциал на пластинке относительно исходного уровня φ_0 ; g_m — электропроводность единицы площади пластинки за счет индуктивной составляющей.

Первое слагаемое уравнения (10) отражает емкостный ток смещения, второе слагаемое — индуктивный ток через киральные элементы.

Для спирального кирального элемента можно записать уравнение баланса напряжений:

$$-L_i S_i \frac{\partial j_i}{\partial t} = (\varphi - \varphi_0), \quad (11)$$

где j_i — плотность тока через i -й киральный элемент; L_i — индуктивность i -го кирального элемента; S_i — площадь пластинки, приходящаяся на один киральный элемент, имеющий индуктивную электропроводность g_i .

Плотность тока j_i через киральный элемент связана с разностью потенциалов на пластинке и электропроводностью этого кирального элемента g_i по формуле закона Ома:

$$j_i S_i = g_i (\varphi - \varphi_0). \quad (12)$$

Подставляя (12) в (11), найдем

$$g_i = -\frac{(\varphi - \varphi_0)}{L_i \frac{\partial \varphi}{\partial t}}. \quad (13)$$

Электропроводность, приходящаяся на единицу площади пластинки, равна

$$g_m = -\frac{(\varphi - \varphi_0)}{S_i L_i \frac{\partial \varphi}{\partial t}}, \quad (14)$$

где учтено $g_i = g_m S_i$.

Подставив (14) в (10), найдем:

$$j_m = C_m \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{(\varphi - \varphi_0)^2}{S_i L_i \frac{\partial \varphi}{\partial t}}. \quad (15)$$

Используя $C_i = C_m S_i$ — емкость пластинки, приходящуюся на один киральный элемент, и обозначая $\omega_0^2 = \frac{1}{C_i L_i}$ — собственную частоту киральной системы, найдем:

$$\frac{j_m}{C_m} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 - (\varphi - \varphi_0)^2 \omega_0^2. \quad (16)$$

Рассмотрим пластинку, состоящую из одного ряда киральных элементов (рис. 2).

Вдоль этой пластинки течет индуктивный ток.

Закон электромагнитной индукции для этого тока имеет вид:

$$-L \frac{\partial I_X}{\partial t} = \varphi - \varphi_0, \quad (17)$$

где $I_X = \gamma_X \frac{S}{l} (\varphi - \varphi_0)$ — продольный индуктивный ток; γ_X — удельная индуктивная электро-

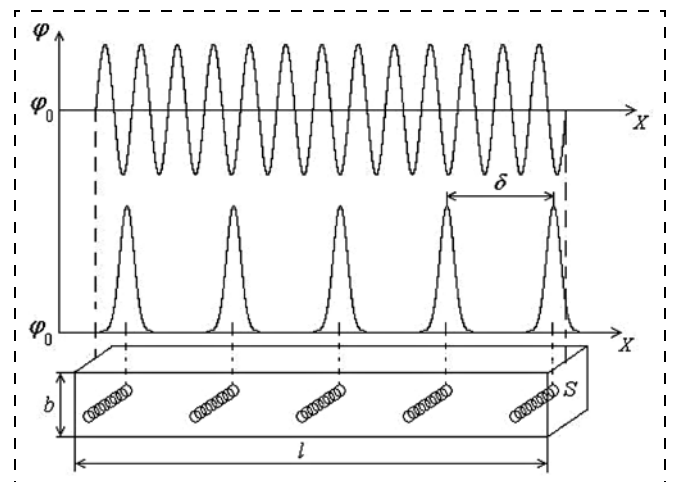


Рис. 2. Однорядная киральная пластинка

проводность однорядной пластинки; L — ее индуктивность; S — площадь поперечного сечения однорядной пластинки; l — ее длина.

Следовательно,

$$-\gamma_X S L_1 \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \varphi - \varphi_0, \quad (18)$$

где $L_1 = L/l$ — индуктивность единицы длины однорядной пластинки.

По закону Ома для плотности продольного тока имеем:

$$j_X = -\gamma_X \frac{\partial \varphi}{\partial X}. \quad (19)$$

Следовательно,

$$dj_X = -\gamma_X \frac{\partial^2 \varphi}{\partial X^2} dX. \quad (20)$$

Поделив (20) на (18) и сократив на γ_X , найдем:

$$dj_X = \frac{\varphi - \varphi_0}{S L_1} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial X^2} dX. \quad (21)$$

Вместе с тем, учитывая, что продольный ток определяется только наличием поперечного тока (или наоборот), имеем

$$S dj_X = j_m b dX, \quad (22)$$

где b — ширина однорядной пластинки.

Подставляя (21) в (22), получим:

$$j_m = \frac{\varphi - \varphi_0}{L_1 b} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial X^2}. \quad (23)$$

Далее, подставляя (23) в (16), найдем:

$$\frac{\varphi - \varphi_0}{C_m L_1 b} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial X^2} = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 - (\varphi - \varphi_0)^2 \omega_0^2. \quad (24)$$

Учитывая, что $C_1 = C_m b$ — емкость единицы длины однорядной пластинки и $V^2 = \frac{1}{C_1 L_1}$ — квадрат скорости электромагнитного поля вдоль пластинки, имеем:

$$V^2 (\varphi - \varphi_0) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial X^2} = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 - (\varphi - \varphi_0)^2 \omega_0^2. \quad (25)$$

Нелинейное уравнение (25) можно преобразовать к виду, справедливому для пространственной геометрии:

$$V^2 \Delta \varphi + \omega_0^2 (\varphi - \varphi_0) = \frac{1}{\varphi - \varphi_0} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2. \quad (26)$$

Линеаризацию уравнения (26) можно осуществить соотношением (8):

$$\Delta \varphi(\mathbf{r}) + k_S^2 \varphi(\mathbf{r}) = 0, \quad (27)$$

где $k_S^2 = \frac{\omega_0^2 + \omega^2}{V^2} = k_0^2 + k^2$, где k_S — волновое

число электромагнитной волны в киральной среде.

Заметим, что нелинейное уравнение, аналогичное (25) и (26), возникает при исследовании самоиндуцированной прозрачности вещества [9].

3. Различные виды решений уравнения взаимодействия метаматериала и электромагнитной волны

Уравнения (27) и (9) отражают один и тот же физический процесс — распространение электромагнитных колебаний по киральной пластинке. Различие заключается в том, что при выводе (27), в отличие от (9), не было необходимости использовать материальные уравнения (1)–(4), т. е. параметр киральности не вводился.

На основе тождества уравнений (27) и (9) можно положить:

$$k_S^2 = k_0^2 + k^2 = (1 + \chi)^2 k^2. \quad (28)$$

В дальнейшем для определенности предполагаются правовращающие киральные элементы.

Следовательно, параметр киральности можно записать в виде:

$$\chi = \sqrt{1 + \frac{k_0^2}{k^2}} - 1. \quad (29)$$

Если $k_0 \ll k$ или $\omega_0 \ll \omega$ (собственная частота киральной среды много меньше частоты падающей электромагнитной волны), то формула (29) упрощается:

$$\chi = \frac{k_0^2}{2k^2} = \frac{\omega_0^2}{2\omega^2}. \quad (30)$$

Заметим, что квантово-механический расчет оптически активного вещества [10, 11] приводит к формуле для параметра киральности:

$$\chi = \frac{2V\eta}{3\hbar} \frac{\omega_{0j}}{\omega_{0j}^2 - \omega^2}, \quad (31)$$

где \hbar — приведенная постоянная Планка; η — величина, пропорциональная произведению действительных частей электрического и магнитного дипольных моментов энергетического перехода оптически активной молекулы, возбуждаемого светом данной длины волны; $\omega_{0,j}$ — в данном случае частота, соответствующая энергетическому переходу $0 \rightarrow j$ [12].

Увеличение степени частотной зависимости ω_0 до квадратичной в формуле (30) по сравнению с (31) является характерным при переходе из квантовой области в классическую.

На рис. 2 показан иллюстративный график колебаний потенциала на киральной пластинке в соответствии с колебательными решениями, удовлетворяющими уравнениям (9) и (27). Характер колебаний будет исследован ниже.

Решение в виде уединенных волн. Нелинейное уравнение (25) имеет, по крайней мере, еще одно решение в виде уединенной бегущей волны:

$$\varphi - \varphi_0 = \varphi_{\max} \exp\left(-\frac{(k_0(X - X_0) \pm \omega_0(t - t_0))^2}{2}\right), \quad (32)$$

где $k_0 = \omega_0/V$ — волновое число собственной бегущей по киральной среде волны; φ_{\max} — амплитудное значение потенциала $\varphi - \varphi_0$; X_0 — координата центра кирального элемента и, соответственно, максимума (центра) волнового импульса; t_0 — время достижения этого максимума. Знак минус относится к волне, распространяющейся слева направо, знак плюс — справа налево.

Рост потенциала над киральными включениями (см. рис. 2) обусловлен пропорциональностью реактивного сопротивления киральных включений их индуктивностям $\varphi - \varphi_0 \sim X_{Li} = \omega L_i$.

Из анализа обоих графиков можно заключить, что верхний график рис. 2 относится к достаточно частым включениям киральных элементов в пластинке, а нижний — к более редким. Поэтому вводить параметр киральности в решение (32) нерационально.

Очевидно, для нелинейных уравнений (25) или (26) должно существовать многоволновое решение. Многоволновые решения найдены для очень ограниченного круга нелинейных волновых уравнений [13, 14]. Многоволновое решение должно зависеть от концентрации киральных элементов в пластинке. Только с его помощью можно понять, при каких условиях можно обоснованно вводить параметр киральности, т. е. понять границы применимости материальных уравнений (1)—(4).

Уравнение (25) допускает многоволновое решение в виде:

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi_{\max} \times \sum_{n=1}^N \exp\left(-\frac{(k_0(X - X_{0n}) - \omega_0(t - t_{0n}))^2}{2}\right), \quad (33)$$

где N — число волн-импульсов, укладываемых на длине l пластинки (рис. 2), равное числу киральных элементов; n — текущий номер импульса; X_{0n} — координаты максимумов волн-импульсов; t_{0n} — времена достижения этих максимумов.

Подставляя (33) в (25), найдем:

$$\sum_{n=1}^N \varphi_n \sum_{n=1}^N \varphi_n (k_0(X - X_{0n}) - \omega_0(t - t_{0n}))^2 = \left(\sum_{n=1}^N \varphi_n (k_0(X - X_{0n}) - \omega_0(t - t_{0n}))\right)^2, \quad (34)$$

где обозначено

$$\varphi_n = \exp\left(-\frac{(k_0(X - X_{0n}) - \omega_0(t - t_{0n}))^2}{2}\right). \quad (35)$$

Рассмотрим два подряд идущих одинаковых импульса $n = 1, 2$. Записывая для этого случая формулу (34), найдем:

$$\begin{aligned} &(\varphi_1 + \varphi_2)(\varphi_1(k_0(X - X_{01}) - \omega_0(t - t_{01}))^2 + \\ &+ \varphi_2(k_0(X - X_{02}) - \omega_0(t - t_{02}))^2) = \\ &= (\varphi_1(k_0(X - X_{01}) - \omega_0(t - t_{01})) + \\ &+ \varphi_2(k_0(X - X_{02}) - \omega_0(t - t_{02})))^2. \end{aligned} \quad (36)$$

Преобразовывая формулу (36), получим

$$k_0(X_{02} - X_{01}) - \omega_0(t_{02} - t_{01}) = 0. \quad (37)$$

Формула (37) указывает, что расстояние между киральными элементами $\delta = (X_{02} - X_{01})$ (рис. 2), электромагнитный импульс проходит за время $(t_{02} - t_{01})$ со скоростью $V = \frac{\omega_0}{k_0}$. Величина $\frac{1}{\delta}$ характеризует линейную концентрацию киральных элементов в пластинке.

Используя в (34) $t_{0n} = \frac{X_{0n}}{V} = \frac{k_0 X_{0n}}{\omega_0}$, получаем,

что выражения в скобках (34) не зависят от n , их можно вынести за знак суммы и сократить. В результате (34) превращается в тождество.

Следовательно, (33) является многоволновым решением нелинейного уравнения (25).

Наиболее простой вид многоволновое решение (33) приобретает в случае одинакового

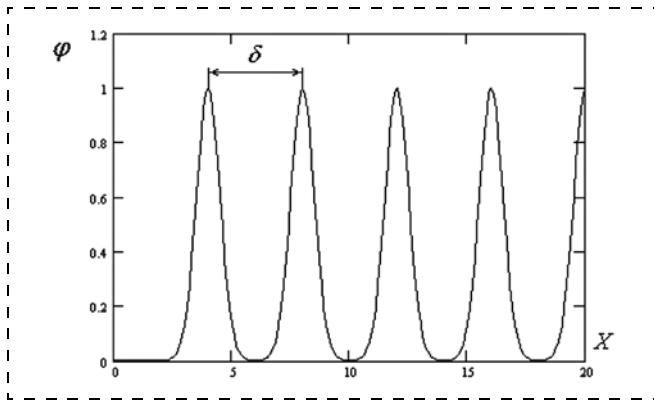


Рис. 3. Следующие друг за другом импульсы в многоволновом решении

расстояния между всеми импульсами и, соответственно, между киральными элементами. В этом случае координаты максимумов импульсов $X_{0n} = n\delta$, а времена достижения максимумов

$$t_{0n} = \frac{k_0 X_{0n}}{\omega_0} = \frac{k_0 n \delta}{\omega_0}.$$

На рис. 3 для иллюстрации показаны несколько следующих друг за другом импульсов, построенных по формуле (33) при условиях: $V = 0$ — отсутствия зависимости от времени (фиксированная во времени картина); $\varphi_0 = 0$, $\varphi_{\max} = 1$; $k_0 = 2$; $\delta = 4$.

Таким образом, формула (33), при условии равномерного распределения одинаковых импульсов, является многоволновым периодическим решением нелинейного уравнения (25).

Решение в виде стоячих волн. Рассмотрим более подробно другой вид волны, возникающей на однорядной киральной пластинке при падении на нее электромагнитной волны.

Стоячие волны чаще всего образуются в линейных системах в результате суперпозиции (интерференции) прямых и отраженных бегущих волн. Однако известно, что стоячие волны могут возникать и в нелинейных системах [15]. Многие физические процессы носят принципиально нелинейный характер, и процесс возникновения стоячих волн в таких системах нетривиален. Рассмотрим возможность возникновения стоячих волн в исследуемой киральной среде.

Нелинейные уравнения (25) и (26) можно решить методом Фурье разделения переменных [16]. Рассмотрим решение уравнения (25) в виде:

$$\varphi - \varphi_0 = \varphi(X)T(t), \quad (38)$$

где $\varphi(X)$ — функция только координаты X ; $T(t)$ — функция только времени t .

Подставив (38) в (25), найдем:

$$\begin{aligned} V^2 \varphi(X) T^2(t) \frac{\partial^2 \varphi(X)}{\partial X^2} &= \\ &= \left(\varphi(X) \frac{\partial T(t)}{\partial t} \right)^2 - \varphi^2(X) T^2(t) \omega_0^2. \end{aligned} \quad (39)$$

Разделим обе части уравнения на $\varphi^2(X) T^2(t)$. В результате получим

$$V^2 \frac{1}{\varphi(X)} \frac{\partial^2 \varphi(X)}{\partial X^2} + \omega_0^2 = \left(\frac{1}{T(t)} \frac{\partial T(t)}{\partial t} \right)^2 = -\alpha^2, \quad (40)$$

где α — постоянная величина.

Уравнение (40) распадается на два независимых уравнения. Уравнение, зависящее от X , имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \varphi(X)}{\partial X^2} + \left(k_0^2 + \frac{\alpha^2}{V^2} \right) \varphi(X) = 0. \quad (41)$$

Сравнивая (41) и (27), замечаем, что $k_S^2 = k_0^2 + \frac{\alpha^2}{V^2}$. Следовательно, $k^2 = \frac{\alpha^2}{V^2}$ и, соответственно, $\alpha = \omega$.

Решение уравнения (41) запишем в виде:

$$\varphi(X) = \varphi(0) \exp(ik_S X), \quad (42)$$

где $\varphi(0)$ — значение функции $\varphi(X)$ в начале координат.

Второе уравнение равенства (40) имеет вид:

$$\frac{\partial T(t)}{\partial t} = i\omega T(t). \quad (43)$$

Решая это уравнение, найдем:

$$T(t) = T(0) \exp(i\omega t), \quad (44)$$

где $T(0)$ — начальное значение функции $T(t)$.

Используя (38), (42) и (44), найдем решение уравнения (25) в виде:

$$\varphi - \varphi_0 = \varphi_A \exp(i\omega t) \exp(ik_S X), \quad (45)$$

где обозначено $\varphi_A = T(0)\varphi(0)$ — амплитудное значение потенциала $\varphi - \varphi_0$ на пластинке.

Функция $\varphi - \varphi_0$ не должна иметь мнимых слагаемых, потенциал — величина действительная. Использование экспонент с мнимыми показателями вводится для удобства преобразований. Реально в этих экспонентах нужно учитывать только действительные слагаемые. Поэтому формула (45) описывает решение уравнения (25) в виде стоячих волн:

$$\varphi - \varphi_0 = \varphi_A \cos \omega t \cos k_S X = \varphi_A \cos \omega t \cos \frac{2\pi X}{\delta}, \quad (46)$$

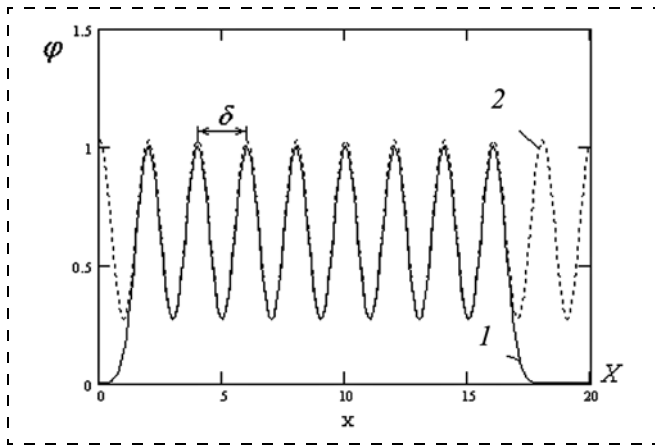


Рис. 4. Переход многоволнового решения в решение в виде стоячей волны:

1 — многоволновое решение; 2 — стоячая волна

где φ_A — амплитудное значение стоячих волн; δ — длина волны.

Условие возникновения узлов в стоячей волне $X_{уз} = \pm(2n + 1)\frac{\delta}{4}$, где $n = 0, 1, 2, \dots$

На концах однорядной киральной пластинки, показанной на рис. 2, должны быть узлы стоячей волны. Если возбуждение волны происходит в центре пластинки, то номер максимально удаленного от центра пластинки узла можно найти по формуле $\pm\frac{l}{2} = \pm(2n_{max} + 1)\frac{\delta}{4}$ или

$$n_{max} = \left(\frac{l}{\delta} - \frac{1}{2}\right).$$

Нужно отметить, что бегущие волны $\varphi - \varphi_0 = \frac{\varphi_A}{2} \cos(k_S X \pm \omega t)$, с учетом $k_S^2 = \frac{\omega_0^2 + \omega^2}{V^2}$, не являются решением уравнения (25), поэтому формулу (46) с физической точки зрения нельзя представить как сумму прямой и отраженной от границ пластинки волн, хотя математически эту процедуру несложно сделать. Это следствие нелинейности уравнения (25).

В заключение интересно проследить графически переход многоволнового решения (33) в решение в виде стоячих волн (46). Этот переход осуществляется при сближении импульсов (см. рис. 2, 3), т.е. при уменьшении величины δ .

На рис. 4 показаны два графика. График 1 построен по формуле (33) при условиях: $V = 0$, $\varphi_0 = 0$, $\varphi_{max} = 1$, $k_0 = 2$, $\delta = 2$ для $N = 8$ импульсов. График 2 (пунктиром) построен по формуле (46) при условиях $\varphi_0 = 0,65$ и $\varphi_A \cos \alpha t = 0,38$ для некоторого момента времени t .

Заключение

Распределение потенциала на пластинке из метаматериала с индуктивными киральными включениями исследовано как с использованием материальных уравнений совместно с уравнениями Максвелла, так и на основе детального метода расчета взаимодействия киральных элементов и электромагнитной волны. Сравнение двух подходов позволило выяснить, что введение параметра киральности корректно только при достаточно высокой концентрации киральных включений. На основе сравнения результатов двух методов найдена частотная зависимость параметра киральности. При использовании детального метода расчета получено нелинейное уравнение для потенциала, имеющее решения в виде стоячих волн и уединенных волн. Бегущие синусоидальные волны не являются решением этого уравнения. Показано существование многоволнового решения нелинейного уравнения. При уменьшении расстояния между киральными элементами исследован процесс перехода многоволнового решения нелинейного уравнения в решение в виде стоячей волны.

Список литературы

1. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы // Электроника: НТБ. № 7. 2009. С. 70—79.
2. Capolino F. Theory and Phenomena of Metamaterials. Boca Raton: Taylor & Francis, 2009. 992 p.
3. Вендик И. Б., Вендик О. Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот // ЖТФ. Т. 83. Вып. 1. 2013. С. 3—28.
4. Давидович М. В. Гиперболические метаматериалы: получение, свойства, применения, перспективы // УФН. Т. 189. № 17. 2019. С. 1249—1284.
5. Неганов В. А., Осипов О. В. Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами. М.: Радио и связь, 2006. 280 с.
6. Каценеленбаум Б. З., Коршунова Е. Н., Сивов А. Н., Шатров А. Д. Киральные электродинамические объекты // УФН. Т. 167. № 11. 1997. С. 1201—1212.
7. Волобуев А. Н. Электродинамика кругового дихроизма и возможность создания на его основе кругового поляроида // ЖТФ. Т. 86. Вып. 3. 2016. С. 20—24.
8. Левич В. Г. Курс теоретической физики. Т. 1. М.: Физматлит, 1962. 696 с.
9. Волобуев А. Н. Распространение импульса электромагнитного поля в диэлектрике в условиях самоиндуцированной прозрачности // Математическое моделирование. Т.18. № 3. 2006. С. 93—102.
10. Кондон Е. Теория оптической вращающей способности // УФН. Т. 19. № 3. 1938. С. 380—430.

11. **Volobuev A. N.** Quantum Electrodynamics through the Eyes of a Biophysics. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2017. 252 p.

12. **Волькенштейн М. В.** Биофизика. СПб.: Издательство "Лань", 2008. 596 с.

13. **Абловиц М., Сигур Х.** Солитоны и метод обратной задачи / Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 480 с.

14. **Додд Р., Эйлбек Дж., Гиббон Дж., Моррис Х.** Солитоны и нелинейные волновые уравнения. Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 696 с.

15. **Красильников В. А., Крылов В. В.** Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 403 с.

16. **Тихонов А. Н., Самарский А. А.** Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972. 736 с.

A. N. Volobuev, D. Sc., Professor, e-mail: volobuev47@yandex.ru,
Samara State Medical University

Corresponding author:

Volobuev Andrey N., Professor, volobuev47@yandex.ru, Samara State Medical University. E-mail: volobuev47@yandex.ru

Interaction of Electromagnetic Wave and Metamaterial with Inductive Type Chiral Inclusions

Received on January 10, 2020

Accepted on January 20, 2020

The principle of calculation of a plate from a metamaterial with inductive type chiral inclusions is submitted. It is shown that distribution of an electromagnetic wave to such substance can be investigated with the help of introduction of a chiral parameter and on the basis of a detailed method of calculation. By comparison of two methods the dependence of chiral parameter from frequency of electromagnetic radiation falling on a plate is found. With the help of a detailed method the nonlinear differential equation for potential on the chiral plate is found. It is shown that this equation has solutions as traveling solitary and standing waves but not traveling sine waves. The analysis of the received solutions of the nonlinear equation is carried out. Transition from the multiwave solution to the solution as standing waves is graphically shown at reduction of distance between the chiral elements.

Keywords: metamaterial, chiral parameter, inductive inclusions, multiwave solution, standing waves

For citation:

Volobuev A. N. Interaction of Electromagnetic Wave and Metamaterial with Inductive Type Chiral Inclusions, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 140–147.

DOI: 10.17587/nmst.22.140-147

References

1. **Slusar C.** Metamaterialy v antennoi tekhnike: istoria i osnovnye printsipy, *Elektronika: NTB*. no. 7, 2009. pp. 70–79 (in Russian).

2. **Capolino F.** Theory and Phenomena of Metamaterials. Boca Raton: Taylor & Francis, 2009. 992 p.

3. **Vendik I. B., Vendik O. G.** Metamaterialy I ikh primeneniye v tekhnike sverkhvysokikh chastot, *GTF*, 2013, vol. 83, no. 1, pp. 3–28 (in Russian).

4. **Davidovich M. V.** Giperbolicheskie metamaterialy: poluchenie, svoystva, primeneniye, perspektivy, *UFN*, 2019, vol. 189, no. 17, pp. 1249–1284 (in Russian).

5. **Neganov V. A., Osipov O. V.** Otrazhaiushchie, volnovodushchie struktury s kiralnymi elementami. Moscow, Radio i svyaz, 2006, 280 p. (in Russian).

6. **Katselenbaum B. Z., Korshunova E. N., Sivov A. N., Shatrov A. D.** Kiralnye elektrodinamicheskie obiekty, *UFN*. 1997. vol. 167. no. 11. pp. 1201–1212 (in Russian).

7. **Volobuev A. N.** Elektrodinamika krugovogo dikhroizma i vozmozhnost sozdaniya na ego osnove krugovogo poliarioida, *GTF*. 2016, vol. 86, no. 3, pp. 20–24 (in Russian).

8. **Levich V. G.** Kurs teoreticheskoi fiziki. V. 1. Moscow, Fizmatlit, 1962. 696 p. (in Russian).

9. **Volobuev A. N.** Raspredeleniye impulsa elektromagnitnogo polia v dielektrike v usloviakh samoindutsirovannoi prozrachnosti, *Matematicheskoe modelirovaniye*, 2006, vol. 18, no. 3, pp. 93–102 (in Russian).

10. **Kondon E.** Teoria opticheskoi vrashchaiushchei sposobnosti, *UFN*. 1938. vol. 19, no. 3. pp. 380–430 (in Russian).

11. **Volobuev A. N.** Quantum Electrodynamics through the Eyes of a Biophysics. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2017. 252 p.

12. **Volkenshtein M. V.** Biofizika. Saint-Petersburg, Lan, 2008. 596 p. (in Russian).

13. **Ablowitz M. J., Segur H.** Solitons, and the Inverse Scattering Transform. Philadelphia, SIAM, 1981.

14. **Dodd R. K., Eilbeck J. C., Gibbon J. D., Morris H. C.** Solitons and Nonlinear Wave Equation. London, New York, Tokyo: Academic Press, Inc., 1984.

15. **Krasilnikov V. A., Krylov V. V.** Vvedeniye v fizicheskuyu akustiku. Moscow, Nauka, 1984. 403 p. (in Russian).

16. **Tikhonov A. N., Samarski A. A.** Uravneniya matematicheskoi fiziki. Moscow, Nauka, 1972. 736 p. (in Russian).

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.362

DOI: 10.17587/nmst.22.148-152

Д. Г. Мустафаева, канд. техн. наук, доц., e-mail: dzhamilya79@yandex.ru
ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет)", г. Владикавказ

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ПРИ СОЗДАНИИ ПЛЕНОЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Поступила в редакцию 23.12.2019

Рассмотрены конструктивно-технологические факторы и их влияние при создании пленочных преобразователей, требования к материалам и их свойствам, технология формирования параметров преобразователя. Показано, что конструктивно-технологическое воплощение преобразователя обеспечивает соответствия параметров с требуемыми, устойчивость к внешним воздействующим факторам, получение пленок исходного состава, стабильность технологического процесса, технологичность изготовления.

Ключевые слова: материал, свойство, параметр, конструкция, метод, элемент, преобразователь, формирование, структура, слой, фактор

Введение

Основные параметры преобразователей закладываются при разработке основных концепций их создания. Конструктивно-технологические основы реализуются в технологическом процессе создания преобразователей в производственных условиях. Этот процесс обеспечивает формирование структур с определенными свойствами и параметрами. Пленочные преобразователи состоят из определенного числа элементов. В состав элементов преобразователей входят различные слои и структуры [1–3].

Анализ и исследование конструктивно-технологических аспектов при создании пленочных преобразователей

Вся совокупность функциональных элементов и наличие связи между ними образуют состав преобразователя. В зависимости от конкретных

целей в преобразователе выделяют те элементы и связи, которые определяют его функционирование. Глубина разделения преобразователя зависит от цели исследования. Анализ состава преобразователя является необходимой предпосылкой к его математическому моделированию. При анализе состава преобразователя применяют принцип выделения и рассмотрения структур с двухуровневой иерархией. При этом рассматриваемый преобразователь представляет собой верхний уровень, а выделенные элементы — нижний. Если требуется углубить анализ, то каждый из выделенных элементов нижнего уровня рассматривается как самостоятельный, который можно разделить на несколько конструктивных элементов.

В состав преобразователя входят два вида элементов: пассивные, накапливающие и рассеивающие энергию, а также активные в виде источников энергии. К элементам обоих видов относят: в электрических цепях — пассивные элементы

(сопротивление, емкость, индуктивность), активные элементы (источники тока и напряжения).

Свойства исходных материалов преобразователя определяются экспериментально с применением типовых методов исследований. Свойства материалов элементов преобразователя отличаются от свойств исходного материала с учетом влияния технологических факторов и физических параметров.

При математическом моделировании точность по геометрическим параметрам с применением размерных цепей формирует правило определения совокупности соотношений между размерами с учетом существующих между ними связей [4].

Конструкция преобразователя рассматривается как структура и состояние изделия и определяется как класс некоторого множества с одинаковыми свойствами. Под свойствами понимается объективная особенность, позволяющая более точно определить изделие при заданной степени детализации; за их пределами изделие теряет свое функциональное назначение.

Конструкция предусматривает взаимное расположение частей и элементов, способ их соединения, взаимодействие, материал, из которого должны быть изготовлены отдельные элементы, а также подбор конструктивных характеристик, определяющих основу конструкции. Конструкция должна отвечать своему функциональному назначению, быть конструктивной и технологичной. Конструкция предусматривает расчленение преобразователя на нормализованные и унифицированные элементы.

Для обеспечения соответствия параметров требуемым при создании пленочных преобразователей должны выполняться следующие требования:

- обеспечение устойчивости к внешним воздействующим факторам;
- выбор оптимального материала по составу и свойствам;
- получение тонких пленок исходного состава;
- обеспечение стабильности технологического процесса;
- обеспечение наилучших соотношений взаимосвязанных величин, параметрических и структурных;
- обеспечение технологичности.

Данные требования находят свое воплощение в конструкции, которой отдают предпочтение

перед остальными. Ее проектируют с применением модульных концепций технологического обеспечения на основе функционально-технологического синтеза.

Структура преобразователя — совокупность устойчивых связей, обеспечивающих ее целостность и тождественность, т. е. сохранение основных свойств при различных внешних и внутренних изменениях.

Свойства и состояния материалов, из которых выполнен преобразователь, являются первопричиной работоспособности, в основе которой лежат физические закономерности. Чем глубже изучены закономерности, описывающие свойства и состояния материалов, тем достовернее можно сохранить показатели работоспособности в заданных пределах. Структура материала, из которого изготовлен преобразователь, относится к внутренней структуре. В зависимости от методов описания можно получить информацию о выявленной структуре с различной степенью точности.

Модель с совмещенными параметрами наглядно проявляется в теоретической оптимизации параметров элементов, которая сводится к составлению математической модели с последующей оптимизацией функции цели. Функциональные параметры и критерии оптимизации объединяются в показатели преобразователя, свойства материала и геометрические параметры.

Показатели преобразователя определяются воздействием внешних факторов на элементы и могут считаться независимыми от других параметрических групп. Они состоят из показателей, независимых и связанных между собой, заданных фиксированными значениями или неравенствами ограничений. В ответственных случаях показатели перед окончательным выбором подлежат уточнению методами статического и динамического детерминизма, вероятностной прочности для оптимизации значений с учетом прогнозирования параметров преобразователя.

Параметры материала объединяются в самостоятельную параметрическую группу, независимую от других. Они изменяются дискретно в узком пределе ввиду ограниченного выбора марок материала в конкретных ситуациях применения элементов [5—8].

Выбор параметров конструкционных материалов проводится с учетом предполагаемых режимов и условий эксплуатации, режимов статических и динамических нагрузок, действующих на

отдельные элементы преобразователя. При выборе материала следует сосредоточить внимание на несоответствии свойств исходного материала и материала элементов, приводящее к отклонению одноименных параметров технических характеристик, особенно при использовании материалов сложного состава (многокомпонентного).

При сопряжении разнородных материалов учитывают коэффициенты линейного расширения. На выбор оптимальных параметров материала могут оказывать влияние ограничения геометрических параметров. Геометрические параметры однозначно определяют геометрию элемента. Их совокупность образует геометрическую группу, зависящую от свойств исходных материалов.

На стадии проектирования оптимизируемая функция цели состоит из показателей преобразователя, свойств материала и геометрических параметров. По области изменения критерии находят оптимальные показатели преобразователя и функциональные параметры элементов.

В процессе изготовления исходные материалы, конструктивные элементы обрабатывают в различных технологических средах и подвергаются интенсивным механическим и тепловым воздействиям. В результате формируются заданные параметры преобразователя и вместе с этим усиливаются или усугубляются несовершенства, имевшиеся в исходных материалах и конструктивных элементах, а также вносятся новые несовершенства и дефекты, которые прямо или косвенно влияют на выходные параметры преобразователя и на их надежность характеристики.

При изготовлении пленочных элементов преобразователя выбор метода получения тонких пленок определяется назначением пленки, совместимости данного метода с другими технологическими операциями микроэлектронной технологии [9]. Кроме того, для обеспечения воспроизводимости электрофизических свойств тонких пленок методы осаждения должны позволять получать пленки с контролируемым составом. Это особенно важно при получении пленок полупроводниковых соединений в силу таких их особенностей, как наличие множества различных модификаций при незначительно отличающихся составах соединений [10–20]. Проведенный анализ и исследования различных методов получения пленок показали, что энергетическая эффективность процесса ионного распыления материалов в магнетронной системе распыления

и технологическая гибкость позволяют получать тонкие пленки заданного состава. Магнетронная система распыления обеспечивает возможность регулирования толщины пленок путем изменения значения тока, времени осаждения и давления, при котором оно проводится.

Заключение

Свойства и состояния материалов, из которых выполнен преобразователь, определяют его функциональные возможности, в их основе лежат физические закономерности. Выбор материалов проводится с учетом предполагаемых режимов и условий эксплуатации, режимов статических и динамических нагрузок, действующих на элементы преобразователя. Для обеспечения соответствия параметров требуемым при создании пленочных преобразователей устанавливаются определенные требования, которые позволяют сформировать их элементы с заданными свойствами.

Список литературы

1. **Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г., Мустафаев М. Г.** Снижение дефектов структуры и повышение надежности интегральных элементов // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 1. С. 52–58.
2. **Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г., Мустафаев М. Г.** Формирование структур пленочных преобразователей с заданными параметрами // Нано- и микросистемная техника, 2017. Т. 19, № 1. С. 40–44.
3. **Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г., Мустафаев М. Г.** Получение однородных по структуре и равномерных по толщине диэлектрических покрытий при формировании приборных структур // Нано- и микросистемная техника, 2017. Т. 19, № 3. С. 131–136.
4. **Мустафаев М. Г., Мустафаева Д. Г.** Моделирование и алгоритмизация неравновесных процессов при создании микроэлектронных приборных структур // Нано- и микросистемная техника, 2016. Т. 18, № 6. С. 346–356.
5. **Иоффе А. Ф.** Полупроводниковые термоэлементы. Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. 188 с.
6. **Дмитриев А. В.** Современные тенденции развития физики термоэлектрических материалов // Успехи физических наук. 2010. Т. 180, № 8. С. 821–838.
7. **Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г.** Физика полупроводников. М.: Мир, 1977. 678 с.
8. **Горелик С. С., Дашевский М. Я.** Материаловедение полупроводников и диэлектриков. М.: Изд-во МИСИС, 2003. 480 с.
9. **Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г., Мустафаев М. Г.** Технологические особенности получения соединений халькогенидов элементов первой группы и тонких пленок на их основе заданного состава // Нано- и микросистемная техника, 2016. Т. 18, № 8. С. 503–508.

10. **Gelbstein Y., Dashevsky Z., Dariel M. P.** High performance n-type PbTe-based materials for thermoelectric applications // *Physica B: Condensed Matter*. 2005. Vol. 363, N. 1. P. 196–205.

11. **Mahan G. D.** Figure of merit for thermoelectrics // *Journal of applied physics*, 1989. Vol. 65, N. 4. P. 1578–1583.

12. **Sofa J. O., Mahan G. D.** Optimum band gap of a thermoelectric material // *Physical Review B*, 1994. Vol. 49, N. 7. P. 4565–4570.

13. **Bilc D. I., Mahanti S. D., Kanatzidis M. G.** Electronic transport properties of PbTe and AgPbmSbTe_{2+m} systems // *Physical Review B*. 2006. Vol. 74, N. 12. P. 125202.

14. **Akimov B. A., Dmitriev A. V., Khokhlov D. R., Ryabova L. I.** Carrier Transport and Non-Equilibrium Phenomena in Doped PbTe and Related Materials // *Physica status solidi (A)*. 1993. Vol. 137, N. 1. P. 9–55.

15. **Mott N. F., Jones H.** *The Theory of the Properties of Metals and Alloys*. Clarendon., 1936. 326 p.

16. **Heremans J. P., Jovovic V., Toberer E. S.** Enhancement of thermoelectric efficiency in PbTe by distortion of the electronic density of states // *Science*. 2008. Vol. 321, N. 5888. P. 554–557.

17. **Thermoelectric Materials and Devices** / Ed. by I. B. Caddoff, E. Miller. Reinhold Pub. Corp., 1960. 344 p.

18. **Chung D. Y., Hogan T., Brazis P.** CsBi₄Te₆: A high-performance thermoelectric material for low-temperature applications // *Science*, 2000. Vol. 287, N. 5455. P. 1024–1027.

19. **Luo W., Almeida J., Osorio-Guillén J. M., Ahuja R.** Electronic structure of a thermoelectric material: CsBi₄Te₆ // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2008. Vol. 69, N. 9. P. 2274–2276.

20. **Wölfing B., Kloc C., Teubner J., Bucher E.** High performance thermoelectric Tl₉BiTe₆ with an extremely low thermal conductivity // *Physical review letters*. 2001. Vol. 86, N. 19. P. 4350.

D. G. Mustafaeva, Ph. D., Associate Professor, e-mail: dzhamilya79@yandex.ru
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University),
Vladikavkaz, Russian Federation

Corresponding author:

Mustafaeva Dzhamilya G., Ph. D., Associate Professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation, dzhamilya79@yandex.ru

Structural and Technological Approaches to the Creation of Film Converters

Received on December 23, 2019

Accepted on December 30, 2019

Design and technological factors and their influence during the creation of film converters, requirements for materials and their properties, technology for forming converter parameters are considered. It is shown that the structural and technological embodiment of the converter ensures that the parameters meet the required parameters, resistance to external factors, obtaining films of the initial composition, process stability, and manufacturability. The choice of parameters of structural materials is made taking into account the modes and operating conditions, the modes of static and dynamic loads acting on the converter elements, the properties of the starting material and film elements. When pairing dissimilar materials, linear expansion coefficients are taken into account. In the process of creating the converters, the starting materials, structural elements are processed in various technological environments and are subjected to thermal influences, the specified structures and parameters of the film converter are formed, and at the same time, the imperfections in the starting materials and structural elements that directly or indirectly affect the output parameters are amplified converter and their reliability characteristics. In the manufacture of film elements of the converter, the choice of the method for producing thin films is determined by the purpose of the film, the compatibility of the method with other technological operations of microelectronic technology. The reproducibility of the electrophysical properties of thin films takes place when they are deposited with a controlled composition, which is especially important when producing films of semiconductor compounds, due to their features, as the presence of many different modifications with slightly different compositions of the compounds. Analysis and research of methods for producing films showed that the energy efficiency of the process of ion sputtering of materials and the production of thin films of a given composition, technological flexibility, the ability to control the thickness of the films by changing the current, deposition time and pressure at which it is carried out, is the most optimal.

Keywords: material, property, parameter, design, method, element, transducer, formation, structure, layer, factor

For citation:

Mustafaeva D. G. Structural and Technological Approaches to the Creation of Film Converters, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 148–152.

DOI: 10.17587/nmst.22.148-152

References

1. **Mustafaev G. A., Mustafaeva D. G., Mustafaev M. G.** Snizhenie defektov struktury i povyshenie nadezhnosti integral'nyh jelementov, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 52–58 (in Russian).
2. **Mustafaev G. A., Mustafaeva D. G., Mustafaev M. G.** Formirovanie struktur plenochnyh preobrazovatelej s zadannymi parametrami, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 1, pp. 40–44 (in Russian).
3. **Mustafaev G. A., Mustafaeva D. G., Mustafaev M. G.** Poluchenie odnorodnyh po strukture i ravnomernyh po tolshhine dijelektricheskikh pokrytij pri formirovanii pribornyh struktur, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 131–136 (in Russian).
4. **Mustafaev M. G., Mustafaeva D. G.** Modelirovanie i algoritimizacija neravnovesnyh processov pri sozdanii mikrojelektronnyh pribornyh struktur, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 6, pp. 346–356 (in Russian).
5. **Ioffe A. F.** Poluprovodnikovye termojelementy, Leningrad, Akademii nauk SSSR, 1960. 188 p. (in Russian).
6. **Dmitriev A. V.** Sovremennye tendencii razvitija fiziki termojelektricheskikh materialov, *Uspehi fizicheskikh nauk*, 2010, vol. 180, no. 8, pp. 821–838 (in Russian).
7. **Bonch-Bruevich V. L., Kalashnikov S. G.** Fizika poluprovodnikov, Moscow, Mir, 1977. 678 p.
8. **Gorelik S. S., Dashevskij M. Ja.** Materialovedenie poluprovodnikov i dijelektrikov, Moscow, MISIS, 2003, 480 p.
9. **Mustafaev G. A., Mustafaeva D. G., Mustafaev M. G.** Tehnologicheskie osobennosti poluchenija soedinenij hal'kogenidov jelementov pervoj gruppy i tonkih plenok na ih osnove zadannogo sostava, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 8, pp. 503–508 (in Russian).
10. **Gelbstein Y., Dashevsky Z., Dariel M. P.** High performance n-type PbTe-based materials for thermoelectric applications, *Physica B: Condensed Matter*, 2005, vol. 363, no. 1, pp. 196–205.
11. **Mahan G. D.** Figure of merit for thermoelectrics, *Journal of applied physics*, 1989, vol. 65, no. 4, pp. 1578–1583.
12. **Sofo J. O., Mahan G. D.** Optimum band gap of a thermoelectric material, *Physical Review B*, 1994, vol. 49, no. 7, pp. 4565–4570.
13. **Bilc D. I., Mahanti S. D., Kanatzidis M. G.** Electronic transport properties of PbTe and AgPbmSbTe₂ + m systems, *Physical Review B*, 2006, vol. 74, no. 12, pp. 125202.
14. **Akimov B. A., Dmitriev A. V., Khokhlov D. R., Ryabova L. I.** Carrier Transport and Non-Equilibrium Phenomena in Doped PbTe and Related Materials, *Physica Status Solidi (A)*, 1993, vol. 137, no. 1, pp. 9–55.
15. **Mott N. F., Jones H.** The Theory of the Properties of Metals and Alloys, Clarendon., 1936. 326 p.
16. **Heremans J. P., Jovovic V., Toberer E. S.** Enhancement of thermoelectric efficiency in PbTe by distortion of the electronic density of states, *Science*, 2008, vol. 321, no. 5888, pp. 554–557.
17. **Thermoelectric Materials and Devices**, Ed. by I. B. Caddoff, E. Miller, Reinhold Pub. Corp., 1960, 344 p.
18. **Chung D. Y., Hogan T., Brazis P.** CsBi₄Te₆: A high-performance thermoelectric material for low-temperature applications, *Science*, 2000, vol. 287, no. 5455, pp. 1024–1027.
19. **Luo W., Almeida J., Osorio-Guillén J. M., Ahuja R.** Electronic structure of a thermoelectric material: CsBi₄Te₆, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2008, vol. 69, no. 9, pp. 2274–2276.
20. **Wölfing B., Kloc C., Teubner J., Bucher E.** High performance thermoelectric Tl9BiTe6 with an extremely low thermal conductivity, *Physical Review Letters*, 2001, vol. 86, no. 19, pp. 4350.

И. В. Матюшкин, ст. науч. сотр., О. М. Орлов, нач. лаб., А. О. Лебедев, науч. сотр.,
Д. С. Мизгинов, науч. сотр., e-mail: dmizginov@niime.ru
АО НИИМЭ, Зеленоград, Москва, 103460

ФЕНОМЕН НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ПРИ ЦИКЛИРОВАНИИ МЕМРИСТОРА

Поступила в редакцию 23.12.2019

Экспериментально наблюдаемая девиация напряжений переключения мемристора при циклировании рассматривается как феномен детерминированного хаоса, а не как истинно-случайное явление. Предполагается, что имеет место нелинейная динамика по крайней мере двух фазовых величин: одна из них, ставшая общепринятой, — размер филамента (вдоль направления тока), а другая ассоциируется нами с небольшим зарядом, накапливаемым в области филамента. Данный подход не претендует на точное воспроизведение сложных процессов, нося формальный характер, но открыт для включения более обоснованных физически подмоделей. Анализ выходных характеристик одного из типов мемристора с помощью быстрого Фурье-преобразования экспериментальных данных не позволил подтвердить или опровергнуть гипотезу. В спектрах частот наблюдается слабая тенденция большей выраженности низкочастотных колебаний по сравнению с высокочастотными, других же особенностей не обнаружено.

Ключевые слова: мемристор, циклирование, МДМ-структуры, детерминированный хаос, нелинейная динамика

Введение

В настоящее время активно расширяется сфера применения мемристоров в СБИС, в частности в перспективных нейроморфных системах [1, 2]. Резистивная память и мемристоры используются для формирования весовых коэффициентов синаптических связей и в составе "тела" искусственного нейрона, что сдерживается пока слабой воспроизводимостью [3] свойств мемристора (от ячейки к ячейке и при циклировании). Тем не менее за последние 10 лет уже накоплен определенный опыт создания SPICE- и Verilog-A описаний мемристора [4]. Экспериментально наблюдается дрейф характеристик мемристора, т. е. изменение параметров гистерезиса, связанный:

- с числом циклов переключения (циклирование);
- с разбросом технологических параметров от устройства к устройству;

- с разбросом параметров при множественном считывании (random telegraph noise — RTN);
- с фактором температуры, включая эффект саморазогрева.

Описание первого мемристивного элемента, впервые предложенное L. Chua [7] во второй половине прошлого века, формализует его как элемент памяти, меняющий свое состояние в зависимости от его текущего состояния и протекающий сквозь него заряд. Впервые указанные структуры были получены экспериментально в 2000-х годах в лаборатории Hewlett-Packard [8]. В основе работы элемента лежит механизм обратимого изменения электрической проводимости в тонких пленках. К первым работам, направленным на изучение указанного эффекта, можно отнести статьи коллективов J. Simmons [5] и G. Dearnaley [6] конца 1960-х годов. Для удобства будем называть мемристивные элементы мемристорами. Физическая реализация мемристор-

ров часто дается в виде МДМ-структуры. В зависимости от материала активного слоя эффект обратимого переключения электрической проводимости может различаться в части превалирующих физико-химических процессов, приводящих к изменению сопротивления. В одном из основных вариантов структуры мемристора используется оксид переходного металла, и за счет переменной валентности достижимы мультистабильные состояния. При внешней простоте МДМ-структуры и почти полувеккового существования первой филаментарной модели мемристора, а также ставшей стандартной модели дрейфа кислородных вакансий, до сих пор нет ясного понимания физики ее работы. Также представляют интерес мемристоры с функциональным слоем на основе тонких слоев нитрида кремния (4...10 нм), демонстрирующие резистивный эффект переключения [32]. По нашему мнению, общее объяснение состоит в том, что мемристор является хорошим примером системы, находящейся на "лезвии хаоса" (*Edge of Chaos*), т. е. балансирующей между абсолютным порядком и непредсказуемым хаосом — в данном случае вследствие наличия мультистабильности.

Связь физики мемристоров с феноменами нелинейной динамики, не без влияния Леона Чуа, уже осознана [8] и в общем виде тривиальна с позиции внешнего функционирования электрической цепи (см., например, [28] из недавних работ). Но возможна и внутренняя нелинейность, связанная с динамикой филамента и проявляющаяся через циклирование (см. нашу работу [25]). Эту нелинейность в смысле "среднего по времени" на высоком формальном уровне рассмотрели Першин и Слипка в совсем недавних работах [26, 27]. Также в нашей работе [31] проведено исследование использования метода "Reset Verify" для снижения разброса и стабилизации параметров V_{set} и V_{reset} при циклировании мемристора и для получения регулярной нелинейной динамики. Мемристор с его внутренней структурой является примером сложной мультистабильной системы, для анализа которой необходимо применять стохастические методы комплексного системного подхода. При этом роль флуктуаций становится определяющей для функционирования и управления новыми приборами в нанометровом диапазоне.

Целью статьи является развитие идей, связанных с внутренней нелинейной динамикой мемристора с привлечением собственных экспериментальных данных по циклированию в рам-

ках компактной модели формального характера. Хотя общие принципы модели должны быть детализированы для конкретных ситуаций, например биполярного или униполярного переключения, мы неявно будем предполагать Pt, TiN-электроды и HfO_x -диэлектрик толщиной 6 нм (рис. 1, см. третью сторону обложки) на основе работ, в результате которых исследовали мемристоры [3].

Актуальность разработки именно формально-компактной модели, где точность и физическая обоснованность приносятся в жертву простоте реализации и скорости вычислений, обусловлена интенсивным развитием САПР. Отдельно укажем на приложения [9] SPICE- или высокоуровневых описаний мемристоров при моделировании схем смешанных и аналоговых сигналов, таких как кроссбары мемристоров и ячеек памяти (1T-1R) с комплементарной парой биполярных мемристоров [18–20], программируемый генератор на основе биполярного мемристора [21], синапс искусственного нейрона [22] на основе биполярного мемристора. Биполярный пороговый механизм с управлением переключения по напряжению и "функцией окна" на основе многочлена десятого порядка для точного моделирования комплементарной пары мемристоров на кроссбаре представлен в [23]. О роли концепта "функция окна" сказано подробнее в работе [30]; в нашем формализме мы также будем опираться на него.

При формализации мемристоров существуют особенности применения SPICE- и Verilog-A-языковых конструкций. Применение Verilog-A-описания, основанного на главных функциях языка, поддерживаемых различными системами моделирования (Spectre, HSPICE, Xyce), повышает переносимость кода между системами. Применение SPICE-описания было бы релевантным для описания внутренних девиаций параметров устройства за счет использования специализированных компонентов и функций языка, но усложнило бы процесс модификации кода для учета разброса между различными ячейками. Общее описание рассмотренных механизмов и моделей на языке Verilog-A (включая листинг программ) дано в обзоре [11].

Краткий обзор существующих подходов и моделей

По сравнению с традиционными компонентами электрической цепи ключевым свойством мемристора является гистерезис ВАХ. Прямой и обратный ход ВАХ можно описать подгоночной

алгебраической зависимостью, однако получил распространение физически более адекватный дифференциальный подход и представление о внутренних динамических переменных \mathbf{s} . В общем виде эту связь можно представить системой (1), имеющей два варианта представления:

$$\begin{cases} I(t) = f_1(V(t), \mathbf{s}(t)) \\ \mathbf{s}(t) = f_2(V(t), \mathbf{s}(t)) \end{cases} \text{ или } \begin{cases} I(t) = f_1(V(t), \mathbf{s}(t)) \\ \mathbf{s}(t) = f_2(I(t), \mathbf{s}(t)) \end{cases}. \quad (1)$$

Здесь $V(t)$ — напряжение, обычно известное, на контактах мемристора, а $I(t)$ — протекающий через мемристор ток. Для мемристора практически всегда вектор \mathbf{s} отождествляют с размером (от электрода к электроду) проводящего филамента (см. рис. 1) w или с нормированной на толщину оксидного слоя D величиной $x \equiv w/D$, $x \in [0, 1]$. Таким образом, в существующих моделях $\mathbf{s} \leftrightarrow w$.

Тогда в предположении дифференциальной связи система (1) переходит в задачу нелинейной динамики для фазовых переменных \mathbf{s} , где

$$\begin{cases} I(t) = f_1(V(t), \mathbf{s}(t)) \\ \frac{d}{dt} \mathbf{s}(t) = f_2(V(t), \mathbf{s}(t)) \end{cases} \text{ или } \begin{cases} I(t) = f_1(V(t), \mathbf{s}(t)) \\ \frac{d}{dt} \mathbf{s}(t) = f_2(I(t), \mathbf{s}(t)) \end{cases}. \quad (2)$$

К одному из первых примеров построения компактной модели мемристоров относится работа [2], ориентированная на биполярный механизм переключения. Подходы к описанию мемристивных компонентов изначально базировались на модели линейного ионного дрейфа. Следствием такого предположения является применение зависимости, учитывающей смещение границы между сильно допированными кислородными вакансиями и слабо допированными регионами и по факту отражающей линейную омическую связь:

$$f_1 \leftrightarrow V(t) = I(t) \left(R_{ON} \frac{w(t)}{D} + R_{OFF} \left(1 - \frac{w(t)}{D} \right) \right), \quad (3)$$

$$f_2 \leftrightarrow w(t) = \mu_V \frac{R_{on}}{D} q(t).$$

Здесь R_{OFF} , R_{ON} — константное значение низко проводящего и высоко проводящего состояний соответственно. Модель линейного дрейфа на

языке Verilog-A представлена в работе [10]. Более поздние модели и SPICE-описания учитывают нелинейность ионного дрейфа [11]. В частности, выражение для f_1 переписывалось в виде (4):

$$I(t) = w(t)^n \beta \sinh(\alpha V(t)) + \chi [e^{\gamma V(t)} - 1], \quad (4)$$

где α , β , χ , γ , n — коэффициенты. Описание модели нелинейного дрейфа на языке Verilog-A дано там же.

Большинство работ предусматривали применение "функции окна" (*window function*) $f_w(x)$, ограничивающей выход за пределы допустимых значений сопротивления мемристора. Таким образом, первое уравнение системы (2) специфицировано линейной (3) или нелинейной функцией (4), а второе уравнение системы уравнений (2) специфицировано мультипликативно, через разделение переменных:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= f_2(x, I) \triangleq k I(t) f_w(x), \\ x \equiv w/D, \quad k &= \frac{\mu_V R_{ON}}{D^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Удобная особенность "функции окна" — ее безразмерность и ограничение $x \in [0; 1] \wedge f_w \in [0; 1]$. Этому условию отвечает полиномиальный вид, например, использованный в работе [12]:

$$f_w(x) = 1 - (2x - 1)^{2p}, \quad p \in \mathbb{N}. \quad (6)$$

Здесь p — подстановочный параметр. Коэффициент пропорциональности k связывают обычно с подвижностью кислородных вакансий μ_V . Впоследствии свои вариации аналогичных функций были предложены и в других работах [13, 14].

Подход, базирующийся на применении более ресурсоемких вычислений для повышения точности модели без применения "функции окна", представлен в статье [15] и основан на учете тунелирования носителей между филаментом и электродом (размер условно непроводящей области равен около 1...2 нм):

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dt} &= f_2(w, I) = \\ &= \begin{cases} f_{off} \sinh\left(\frac{I}{i_{off}}\right) \exp\left(-\exp\left(\frac{w - a_{off}}{w_c} - \frac{|I|}{b}\right) - \frac{w}{w_c}\right), \\ I(t) > 0 \\ f_{on} \sinh\left(\frac{I}{i_{on}}\right) \exp\left(-\exp\left(\frac{w - a_{on}}{w_c} - \frac{|I|}{b}\right) - \frac{w}{w_c}\right), \\ I(t) < 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

где $f_{off}, f_{on}, i_{off}, i_{on}, a_{off}, a_{on}, b, w_c$ — подстановочные параметры.

В работе [16] представлено менее ресурсоемкое по сравнению с (7) описание механизмов изменения проводимости, основанное на токе, превышающем пороговое значение. Данный класс моделей назовем пороговым:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \begin{cases} k_{off} \left(\frac{I(t)}{i_{off}} - 1 \right)^{a_{off}} f_{off}(x), & 0 < i_{off} < i, \\ 0, & i_{on} < i < i_{off}, \\ k_{on} \left(\frac{I(t)}{i_{on}} - 1 \right)^{a_{on}} f_{on}(x), & i < i_{on} < 0. \end{cases} \quad (8)$$

Достаточно общая модель с управляющим внутренним состоянием проводимости мемристора пороговым напряжением дана в работе [17]. Не претендуя на полноту, суммируем многообразие моделей в таблице.

Описание авторской компактной модели

Новизна нашего подхода заключается в трактовке разброса (девиации) внешних параметров мемристора при циклировании как псевдослучайного, вызванного нелинейной динамикой системы. Под циклированием мы понимаем отклик мемристора на такой подаваемый с периодом T сигнал напряжения, т. е. $V(t + T) = V(t)$, что мемристор проходит все свои мультистабильные состояния. Модель основана на второй репрезентации (2), т.е. на переключении по току, и многочисленных экспериментальных данных по девиации напряжений переключения. Заметим,

что интерпретация результатов зависит от методики циклирования; по умолчанию будем считать, что оно проводится импульсами треугольной формы для биполярного переключения, дискретизованными ступеньками.

Базовые предпосылки состоят в следующем.

P1. Девиация внешних параметров мемристора от цикла к циклу, в простейшем случае напряжений переключения $V_{SET}(n), V_{RESET}(n)$, где n — номер цикла, результат не столько случайных процессов, сколько нелинейной динамики и свойственному ей феномену детерминированного хаоса.

P2. Число фазовых переменных динамической системы не менее двух, причем одна (w) уже присутствует в существующих моделях, а другая (Q) не имеет ясной физической интерпретации, т. е. $s = (w, Q)$.

P3. Несмотря на то что величина Q в компактной модели мемристора вводится сугубо формально, как, например, большинство SPICE-параметров модели транзистора, мы, тем не менее, для лучшего понимания ассоциируем с ней физический смысл накопленного в области филамента условно неподвижного, "фиксированного" заряда; общими условиями его возникновения служат нестехиометрия оксида, оборванные связи и многообразные ловушечные уровни.

P4. Общей причиной изменения "фиксированного" заряда является суммарный электронный заряд, протекший через мемристор в обоих направлениях за время от начала цикла, т. е.

$$Q(t) = Q(0) + F \left(\int_0^t I(t) dt \right), \quad t \in [0; T], \quad \text{где } Q(0) —$$

Наименование модели	Управляется током (I)/ Управляется напряжением (U)	Биполярный механизм (Bi)/ Униполярный механизм (Un)	Пороговые функции описания	Применение функций окна	Возможность задания нелинейности в модели	Учет разброса параметров	Учет температуры
Линейный дрейф [2]	I	Bi					
Линейный дрейф [10]	U	Bi	+	+			
Нелинейный дрейф [12]	I	Bi		+	+		
Нелинейный дрейф [13]	U	Bi	+	+	+		
TEAM [16]	I	Bi	+	+	+		
Туннелирование сквозь барьер [15]	I	Bi			+		
Memristor Device Model [11]	U	Bi + Un	+	+	+		
SPICE Verilog-A model [12]	U	Un	+		+		
VTEAM [17]	U	Un + Bi	+	+	+		
SPICE model [14]	U	Bi + Un	+	+	+	+	+

первоначальный заряд, накопленный в начале периода; допускается, что заряд Q — дискретная величина, т. е. может измеряться в единицах элементарного $Q = Ne$.

Обоснуем положения P1—P4. На рис. 2 (см. третью сторону обложки) представлены экспериментальные данные для системы Pt/HfO_x/TiN. Выделяют, включая родственную область сегнетоэлектриков, регионы "wake-up" и "fatigue", что, по нашему мнению, отражает переход траектории динамической системы из области слабо отталкивающей неподвижной точки или аттрактора в бесконечность (либо к притягивающей нулевой точке). Такой подход коррелирует с представлением о "странном аттракторе". Подчеркнем, что стохастичность кажущаяся, обусловленная сложными физическими процессами, которые мы, находясь в ограничениях простоты и компактности модели, вынуждены описывать заведомо огрубленно и формально. Разумеется, деградацию системы в области "fatigue" можно объяснять иначе, исходя из жесткой структурной перестройки, но при правильном подборе связей для фазовых переменных компромисс возможен, и здесь формальность подхода, наоборот, является сильной стороной.

Как следует из теоремы Пуанкаре—Бендиксона, для системы автономных дифференциальных уравнений необходимым условием существования детерминированного хаоса (апериодических колебаний на рис. 2) является трехмерность фазового пространства. При циклировании имеет место периодическое внешнее воздействие, которое снимает автономность и накладывает дискретность отсчетов, да и алгебраическая связь тока (3) легко трансформируется в дифференциальную, т.е. третья "недостающая" переменная — сам ток. Таким образом, размерность понижается до двух (P2) и остается найти только вторую переменную Q , так как первая, очевидно, длина филамента в направлении тока.

Следует сказать, что в ряде работ предлагалось учитывать, помимо длины филамента, его ширину. По нашему мнению, нельзя считать ширину филамента переменной, не зависящей от его длины, так как обе связаны с дрейфом кислородных вакансий. Мы находим естественным предположение о том, что второй фазовой переменной Q является нескомпенсированный заряд (P3) в области филамента, идеализируемый цилиндром с гипотетическими стенками. Если в этой области имеет место движение электронов,

то небольшая часть этого потока может "осесть" на стенках, заполнить ловушечные уровни нестехиометрического оксида. И, наоборот, достаточно сильное внешнее поле, вместе с обратным потоком (P4), может увести к электроду захваченный ранее заряд. Значение положительного или отрицательного заряда ограничено емкостью филамента Q_{\max} . Она зависит от природы материала, технологии получения оксидного слоя и т. п. Объем филамента несколько кубических нанометров, что соответствует 10...30 ловушкам, т. е. Q , возможно, меняется дискретно. Будем, однако, считать Q непрерывной величиной, приращение которой зависит от протекшего по филаменту за некоторый промежуток времени заряда q , т.е. от тока $I(t)$. Заметим, что физико-химические процессы, происходящие прежде всего в объеме филамента, до конца не изучены и протекают скорее по квантовым, чем по классическим законам. Поэтому сделаем еще одно упрощающее и идеальное предположение.

P5. Весь заряд Q сосредоточен в центре филамента.

Это позволит проводить квазифизические рассуждения и конкретизировать зависимости. Пренебрежем пока направлением тока и будем считать, что точечный заряд Q отрицательного знака препятствует электронному току, создавая энергетический барьер, равный $\sim \frac{Ne^2}{r}$, $r \sim w/2$. Таким образом, происходит эффективное падение внешнего напряжения (для преодоления барьера), и можно переписать базовое соотношение (3) для f_1 в виде:

$$I(t) = \frac{U(Q, t)}{R(w(t))} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I(t) = \frac{V(t) - \alpha \frac{e}{4\pi\epsilon_0 D} \frac{N(t)}{x(t)}}{R_{ON}x(t) + R_{OFF}(1 - x(t))}. \quad (9)$$

Здесь e — заряд электрона; ϵ_0 — электрическая постоянная; α — параметр экранирования. Таким образом, ток через мемристор зависит от длины филамента по рациональному линейно-квадратичному закону. Другой, более конкретный, путь учета заряда связан с идеей, что линии тока искривляются, обтекая заряд Q по сторонам, и таким образом уменьшается эффективная площадь филамента, что приводит к возрастанию его сопротивления.

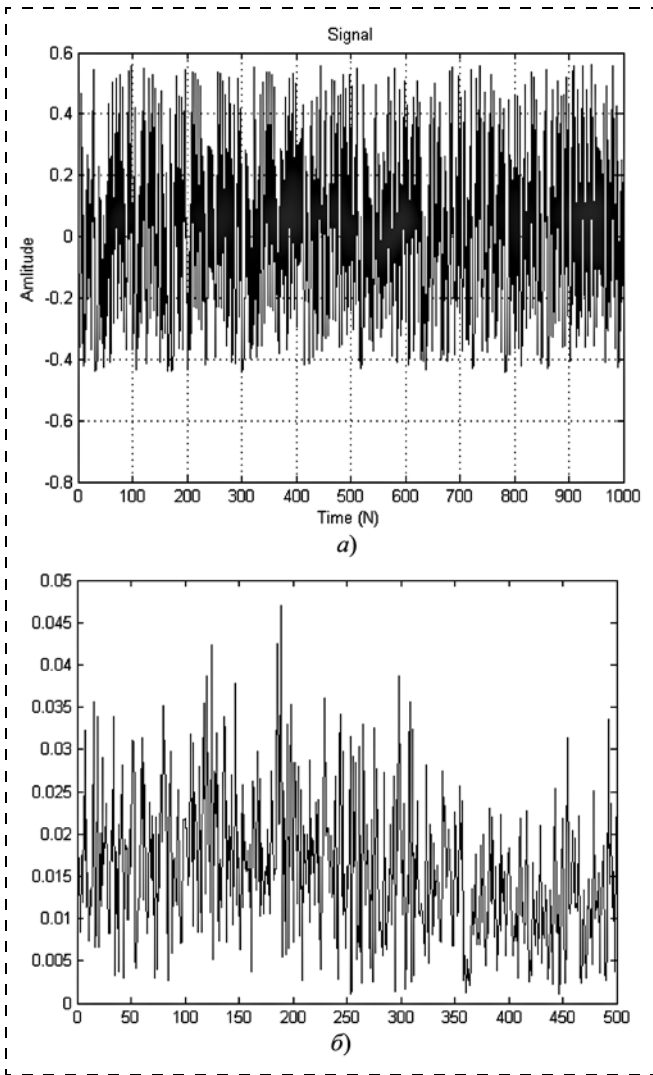


Рис. 3. Пример детерминированного хаоса:
a — исходный сигнал, получаемый по (15) из 1000 точек (без начальной); *b* — амплитуда Фурье-спектра нормализованного сигнала

Второе векторное соотношение из (2) перепишем в явном виде:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = kf_w(t, I)I(t), \\ \frac{dN}{dt} = v(N, I)I(t). \end{cases} \quad (10)$$

Первое соотношение (10) наследовано непосредственно из (5) без изменений, хотя теоретически уместно внести уточнение влияния заряда Q на дрейф кислородных вакансий. Во втором соотношении (10) вводим "функцию захвата" заряда $v(N, I)$. На ее роль при упрощающем предположении $v(N) \equiv v(N, I)$ подойдет любая, удовлетворяющая условиям:

$$0 \leq v(N) \leq 1, \quad v(N_{\max}) = 0, \quad v(0) = v_0 < 1. \quad (11)$$

Можно потребовать и монотонности:

$$v(N) = v_0 \left(1 - \frac{N}{N_{\max}} \right),$$

$$v(N) = v_0 \left(\exp \left(1 - \frac{N}{N_{\max}} \right) - 1 \right). \quad (12)$$

Таким образом, имеем динамическую систему трех переменных $\langle x, N, I \rangle$, на которую наложены одна алгебраическая связь (9) и две дифференциальных (10), одна из которых уже известна в компактных моделях, эту систему можно записать в интегральной форме:

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + k \int_0^T f_w(t, I(t, N)) I(t, N) dt \\ N_{n+1} = N_n + \int_0^T v(N, Q_{\max}) I(t, N) dt \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ N \end{pmatrix}_n \rightarrow \begin{pmatrix} x \\ N \end{pmatrix}_{n+1}.$$

Соотношения (13) задают траекторию динамической системы, которая эмпирически наблюдаема в виде последовательности $\langle \langle V_{SET}, V_{RESET}, R_{ON}, R_{OFF} \rangle \rangle$. На рис. 3 представлены результаты моделирования.

Наконец, следует принять в рассмотрение эффект саморазогрева и дополнить в общем виде систему уравнений третьим соотношением вида:

$$\begin{aligned} \theta_{n+1} &= \theta_n + \int_0^T \kappa I(t, N)^2 R(x(t), N) dt, \{f_w, v\} = \\ &= \{f_w(\theta), v(\theta)\}, \end{aligned} \quad (14)$$

где θ — температура; κ — общий коэффициент, отвечающий за теплоемкость и температуропроводность.

Р6. Третьей фазовой переменной является локальная температура филамента.

Заметим, что вопрос о локальной температуре внутри филамента представляется достаточно темным. От температуры зависят практически все коэффициенты, но в нашем случае особенно коэффициент захвата заряда имеет аррениусовский тип температурной зависимости. Введение третьей фазовой переменной, таким образом, снимает все вопросы по размерности системы и запрету Пуанкаре—Бендиксона.

Связь с экспериментом.

Методика циклирования и Фурье-анализ

Уравнения (10)—(14) апеллируют к внутренним переменным, но относительно непосредственному измерению подлежат внешние величины. Хотелось бы обратить внимание на роль развертки сигнала при циклировании и используемые методики при обработке экспериментальных данных (рис. 3). Во-первых, это касается экстракции значений $V_{SET/RESET}$. Они определяются на кривой $V(t)$ в момент разрыва dI/dt , который, вообще говоря, зависит не только от мгновенного значения $V(t)$, но и от интегрального значения $\int V(t)dt$, т. е. от предыстории. Во-вторых, существует асимметрия в точности определения пары $R_{ON/OFF}$. Принятая нами за стандарт методика заключается в поиске экстремума на участках гистерезисной кривой $I(V)$ для dI/dV .

Приводимые ниже экспериментальные данные и результаты их обработки ввиду чувствительности к индивидуальным особенностям физико-химической структуры образцов имеют лишь условно-иллюстративное значение и нейтральны по отношению к принятой нами гипотезе детерминированного хаоса. Авторы скептически относятся к возможности отличить друг от друга случайный и псевдослучайный временной ряды, тем не менее провести спектральный анализ сигнала — это естественное научное требование. Ограниченность Фурье-анализа для феноменов нелинейной динамики в смысле угадывания формульной закономерности демонстрирует пример (15) и рис. 3. Возьмем известную псевдослучайную последовательность, закон которой известен, и найдем ее Фурье-разложение (быстрое дискретное преобразование). В качестве примера рассмотрим (15), где используется операция взятия дробной части $\{ \}$:

$$x_{n+1} = f(x_n), \quad f(x) = \left\{ \frac{ax}{x+b} \right\}, \quad \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \end{pmatrix}, \\ x_0 = 0,9. \quad (15)$$

При таких начальных данных имеет место динамический, или детерминированный, хаос, причем Фурье-разложение также выглядит хаотическим (рис. 3, а, б). Заметим, что для другого начального условия $x_0 = 1/2$ динамика регулярна: $x_n \rightarrow 0$.

Методика расчета Фурье-спектра (код MATLAB вынесен в Приложение) заключается в приведении вектора-столбца сигнала, т. е. исходных данных $\langle x_0, x_1, \dots, x_m \rangle$, к нормализованному виду: $x \rightarrow (x - \bar{x}) / (x_{\max} - x_{\min})$, т. е. от сигнала

отнимается среднее арифметическое и затем последнее делится на разность максимального и минимального значений по столбцу. Эту методику применяли для тестового примера суммы синусов. На графиках Фурье-образов шкала деления абсциссы 1 соответствует естественной частоте данных $\omega_1 = 2\pi/m$, где m — общее число точек без одной. Чтобы получить дополнительные частоты меньше минимальной или в промежутке между второй и минимальной, т. е. $\omega \in (\omega_1; \omega_2 = 2\omega_1)$, что невозможно при стандартном применении функции `fft` MATLAB, мы прибегли к искусственному приему, а именно в качестве аргумента функции приняли четырехкратное периодическое повторение сигнала. На линии шивки оригинальных сигналов взяли значение полусуммы первой и последней точек сигнала, как это следует из теории рядов Фурье. В итоге строили три графика: оригинальный сигнал с нормировкой; оригинальный Фурье-образ нормированного сигнала (график ограничивался 50 %-й частотой от максимальной с учетом теоремы Котельникова); Фурье-образ в области низких частот для четырехкратного продолжения оригинального сигнала. К сожалению, данный искусственный прием не дал эффекта, поэтому погрешность интерполяции спектра в области низких частот довольно большая.

Исходный образец представлял собой (см. рис. 1, а) трехслойку: нижний электрод Pt толщиной 20 нм, верхний электрод TiN — 50 нм; функциональный слой нестехиометрического HfO_x толщиной 6 нм был сформирован методом атомно-слоевого осаждения. Методика циклирования состояла в многократной последовательной подаче соответствующих импульсов напряжения (см. рис. 1, б).

Характеристики импульсов для $U = 2,0$ В:

- шаг по напряжению — 0,01 В;
- всего измерений на один ступенчатый импульс — 4000;
- всего измерений на цикл считывания — 16 000;
- длительность измерения одной точки (одной ступеньки) ~ 5,4 мс;
- длительность цикла считывания — 5,4 мс \times 16 000 = 86,4 с;
- пересчет на частоту: 1/86,4 с = 0,01 Гц.

В качестве примера взят один из мемристивных элементов с параметрами $V_{SET} = 0,86$ В и $V_{RESET} = -1,18$ В. Гистерезис на вольт-амперной характеристике в пределах одного цикла показан на рис. 4 (см. четвертую сторону обложки) для первого и сотого циклирования.

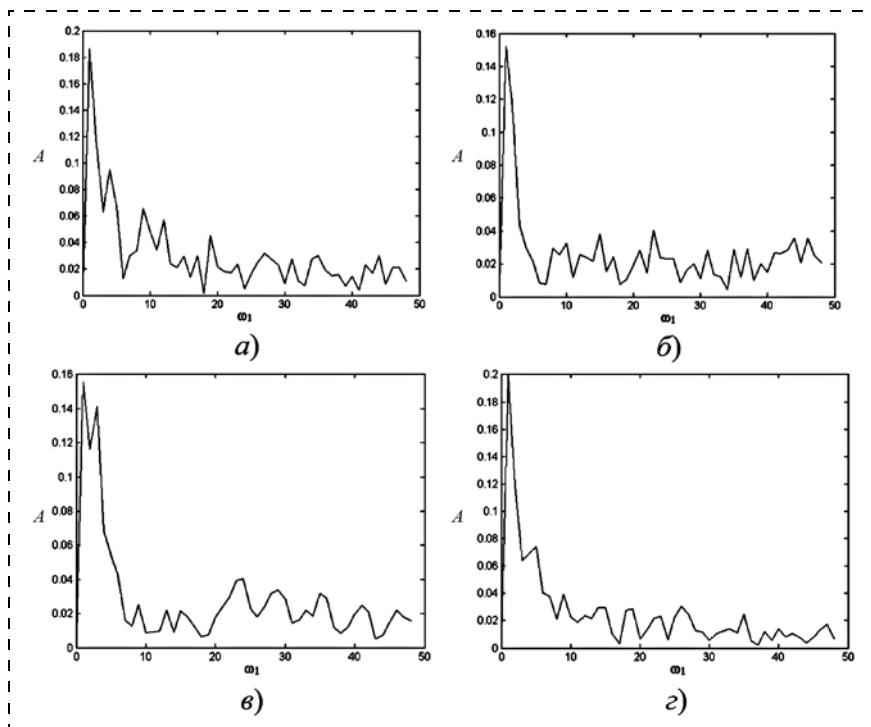


Рис. 6. Фурье-разложение нормализованного сигнала:

$a - V_{SET}$; $b - V_{RESET}$; $v - R_{ON}$; $z - R_{OFF}$; значения A и ω_1 представлены в относительных единицах

Обращает на себя внимание резкий переход в высокопроводящее состояние (SET), т. е. достаточное надежное определение пары $\langle V_{SET}, R_{OFF} \rightarrow R_{ON} \rangle$. А вот левая часть графика, для которой характерны "дрожания", большая площадь охвата петли и неправильности, определяет пару $\langle V_{RESET}, R_{ON} \rightarrow R_{OFF} \rangle$ неточно. Также стоит отметить более плавный ход кривой на далекой итерации, что в целом согласуется с опытом нелинейной динамики: чтобы орбита точки попала в область аттрактора, необходимо подождать обычно от 4 до 8 итераций.

Исходные данные (сигнал) на основе 100 циклов показаны на рис. 5 (см. четвертую сторону обложки). На рис. 6 представлено Фурье-разложение нормализованного сигнала.

Следует сказать, что для других ячеек превалирование низких частот было выражено слабее.

Заключение

Впервые дано компактное описание физических процессов, происходящих при электрической нагрузке на одиночный мемристивный МДМ-элемент, с точки зрения нелинейной динамики и феномена детерминированного хаоса. Предложенные модельные соотношения не отражают в полной мере сложность электрохимических превращений в тонком активном слое и

ориентированы на вычислительную эффективность. Наша модель не учитывает деградиционных изменений. Вместе с тем, мы допускаем, что при правильном выборе функций окна и захвата модель сможет "поймать" переход в режим "fatigue". Развитие модели позволит более гибко учесть физику электрохимических процессов и более осмысленно подходить к симуляции циклирования мемристивного элемента без привлечения усеченного распределения Гаусса или другого, взятого "по умолчанию".

Сделанный спектральный анализ относится к ограниченному числу образцов, требует дополнения (например, для мемристивных элементов, изготовленных по различным технологиям и толщинам слоев) и имеет лишь иллюстративный характер.

Он не позволяет ни доказать, ни

опровергнуть основную посылку работы. Нами не было выявлено каких-то явных закономерностей в Фурье-спектрах. Единственный вывод, который предположительно можно сделать, состоит в доминировании низкочастотной области спектра.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-03018.

Список литературы

1. **Маевский О. В., Писарев А. Д., Бусыгин А. Н.** и др. Логический коммутатор и запоминающее устройство на основе мемристивных ячеек для электрической принципиальной схемы нейропроцессора // Вестник Тюменского государственного университета. 2016. Т. 2, № 4. С. 100—111.
2. **Тарков М. С.** Реализация нейронной WTA-сети на мемристормом кроссбаре // Прикладная дискретная математика. Приложение. 2015. № 8.
3. **Орлов О. М., Маркеев А. М., Зенкевич А. В.** и др. Исследование особенностей элементов энергонезависимой памяти FRAM и ReRAM, полученных с использованием метода атомно-слоевого осаждения // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 2015. Т. 4 (160). С. 62—68.
4. **Теплов Г. С., Горнев Е. С.** Модель на языке Verilog-A многоуровневого биполярного мемристора с учетом девиаций параметров переключения // Микроэлектроника. 2019. Т. 48, № 3. С. 163—175.
5. **Simmons J. G., Verderber R. R.** New Conduction and Reversible Memory Phenomena in Thin Insulating Films // Proc. R. Soc. A. 1967. Vol. 301. P. 77—102.

6. **Dearnaley G., Morgan D. V., Stoneham A. M.** A model for filament growth and switching in amorphous oxide films // *J. Non-Cryst. Solids*. 1970. Vol. 4. P. 593–621.
7. **Chua L.** Memristor—the missing circuit element // *IEEE Transactions on circuit theory*. 1971. Vol. 18, N. 5. P. 507–519.
8. **Strukov D. B., Snider G. S., Steward D. R., Williams R. S.** et al. The missing memristor found // *Nature*. 2008. Vol. 453, N. 7191. P. 80–83.
9. **Benderli S., Wey T. A.** On SPICE macromodeling of TiO₂ memristors // *Electronics letters*. 2009. Vol. 45, N. 7. P. 377–379.
10. **Emara A. A., Aboudina M. M., Fahmy H. A. H.** Corrected and accurate Verilog-A for linear dopant drift model of memristors // *Circuits and Systems (MWSCAS)*. 2014 IEEE 57th International Midwest Symposium on. — IEEE, 2014. P. 499–502.
11. **Kvatinsky S., Filter D., Talisveyberg K.** et al. Models of memristors for SPICE simulations // *Electrical & Electronics Engineers in Israel (IEEEI)*, 2012 IEEE 27th Convention of — IEEE, 2012. P. 1–5.
12. **Joglekar Y. N., Wolf S. J.** The elusive memristor: properties of basic electrical circuits // *European Journal of Physics*. 2009. Vol. 30, N. 4. P. 661.
13. **Prodromakis T., Peh B. P., Papavassiliou C., Tountzou C.** et al. A versatile memristor model with nonlinear dopant kinetics // *IEEE transactions on electronic devices*. 2011. Vol. 58, N. 9. P. 3099–3105.
14. **Biolek Z., Biolek D., Biolkova V.** SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift // *Radioengineering*. 2009. Vol. 18, N. 2.
15. **Pickett M. D., Strukov D. B., Borghetti Y.** et al. Switching dynamics in titanium dioxide memristive devices // *Journal of Applied Physics*. 2009. Vol. 106, No. 7. P. 074508.
16. **Kvatinsky S., Friedman E. G., Kolodny A., Weyser U.** et al. TEAM: Threshold adaptive memristor model // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2013. Vol. 60, N. 1. P. 211–221.
17. **Kvatinsky S., Ramadan M., Friedman E. G., Kolodny A.** VTEAM: A general model for voltage-controlled memristors // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2015. Vol. 62, N. 8. P. 786–790.
18. **Lupo N., Bonizzoni E., Perez E.** et al. An Approximated Verilog-A Model for Memristive Devices // *Circuits and Systems (ISCAS)*, 2018 IEEE International Symposium on. IEEE, 2018. P. 1–5.
19. **Yang Y., Yimson M., Rishad S., Dhiraj P.** Verilog-A based effective complementary resistive switch model for simulations and analysis // *IEEE Embedded Systems Letters*. 2014. Vol. 6, N. 1. P. 12–15.
20. **Wang X., Xu B., Chen L.** Efficient memristor model implementation for simulation and application // *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. 2017. Vol. 36, N. 7. P. 1226–1230.
21. **Zeng G., Mohanty S. P., Kougianos E., Okobiah O.** Polynomial Metamodel integrated Verilog-AMS for memristor-based mixed-signal system design // *Circuits and Systems (MWSCAS)*, 2013 IEEE 56th International Midwest Symposium on. IEEE, 2013. P. 916–919.
22. **Danilin S. N., Shchanikov S. A., Galushkin A. I.** The research of memristor-based neural network components operation accuracy in control and communication systems // *Control and Communications (SIBCON)*, 2015 International Siberian Conference on. IEEE, 2015. P. 1–6.
23. **Li G., Mohanty S. P., Kougianos E., Okobiah O.** Multinomial based memristor modelling methodology for simulations and analysis // *International Journal of Electronics Letters*. 2015. Vol. 3, N. 1. P. 1–12.
24. **Лебедев А. О., Иванов С. В., Воронов Д. Д., Орлов О. М.** Исследование проблем повторяемости и воспроизводимости характеристик ячейки резистивной памяти на основе оксида гафния // *Наноиндустрия*. 2018. Т. 82, № 9. С. 234–235.
25. **Mikheev R., Teplov G., Matyushkin I.** Compact Model of Nonlinear Dynamics While the Cycling of a Memristor // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019. P. 2057–2061. Doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657191
26. **Pershin Y. V., Slipko V. A.** Dynamical attractors of memristors and their networks // *Europhysics Letters*. 2019, 125, 20002.
27. **Pershin Y. V., Slipko V. A.** Bifurcation analysis of a TaO memristor model, arXiv:1906.01377, June 2019.
28. **Hui Chang, Qinghai Song, Yuxia Li, Zhen Wang, Guanrong Chen.** Unstable Limit Cycles and Singular Attractors in a Two-Dimensional Memristor-Based Dynamic System // *Entropy* 2019. Vol. 21 (4). P. 415; <https://doi.org/10.3390/e21040415>
29. Сайт группы MEM-Q <http://mem-q.ee.duth.gr/>
30. **Slipko V. A., Pershin Y. V.** Importance of the window function choice for the predictive modelling of memristors // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. doi: 10.1109/TCSII.2019.2906295
31. **Orlov O., Murashev V., Lebedev A., Orlov V., Ivanov S.** Features of the Improving of the HFO₂ ReRAM Cells Characteristics Reproducibility // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) 28–31 Jan., P. 2087–2089, Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657230
32. **Orlov O. M., Gritsenko V. A.** Research of features bipolar resistive switching characteristics in Si₃N₄ based structure / Conference NES2019 — New trends INNONEQUILIBRIUM STOCHASTIC MULTISTABLE SYSTEMS AND MEMRISTORS, Book of Abstracts, October 18–21, 2019 ERICE (ITALY). P. 31–32.

Приложение 1. Код MATLAB для проведения Фурье-анализа (с двумя тестовыми примерами)

```
function Fourier=CodeFinal (name) %name – имя файла, содержащего столбец чисел
Signal=0;Fourier=0;Fd = 20;
if (strcmp(name, ''))
    Signal=pseudo(1); % 2 – если нужна сумма синусов sin2x+sin5x
else
    Signal=fromfile(name);
end
plot(Signal);
Sm=mean(Signal);Sma=max(Signal)-min(Signal);Signal=(Signal-Sm)/Sma;
Fourier=transform(1);yield();
```

```

function x=pseudo(flag)
    a=5;b=2;NN=1000;x=zeros(1,NN+1);
    if (flag==1)
        x(1)=0.9; pseudo = @(x) (a*x/(x+b)-fix(a*x/(x+b)));
        for n=1:NN, x(n+1) = pseudo(x(n)); end;
    else
        n=0:NN;x=sin(2*pi/NN*a*n)+sin(2*pi/NN*b*n);
    end
    x=x';
end

function x=fromfile(name)
    x=dlmread(name);
end

function fs=transform(rep)
    SigF=(Signal(1)+Signal(end))/2;Signal(1)=SigF;Signal(end)=SigF;
    Signal=[repmat(Signal(1:(end-1)),rep,1); SigF];
    NN=length(Signal); fs=2*abs(fft(Signal,NN))/NN;
end

function x=yield()
    rep=4;
    figure('Name',strcat('Signal', num2str(length(Signal)), '
Points'));plot(Signal(1:end-1));
    title('Signal'); xlabel('Time (N)'); ylabel('Amlitude');grid on;
    figure('Name', 'Spectrum');F=0:1:(length(Fourier)/2-
1);plot(F,Fourier(1:length(F)));
    Fourier=transform(rep);
    figure('Name', 'SpectrumRep');F=0:1/rep:Fd;plot(F,Fourier(1:length(F)));
    title('SpectrumRep'); xlabel('Frequency'); ylabel('Amlitude');grid on;
end
end

```

I. V. Matushkin, Senior Researcher, e-mail: imatyushkin@niime.ru, **O. M. Orlov**, Laboratory Chief, e-mail: oorlov@niime.ru, **A. O. Lebedev**, Researcher, e-mail: alebedev@niime.ru, **D. S. Mizginov**, Researcher, e-mail: dmizginov@niime.ru, Molecular Electronics Research Institute, Zelenograd, Moscow, 103460, Russian Federation

Corresponding author:

Mizginov Dmitry S., Researcher, Molecular Electronics Research Institute, Zelenograd, 103460, Russian Federation, e-mail: dmizginov@niime.ru

Compact Model of Nonlinear Dynamics while the Cycling of a Memristor

Received on December 23, 2019

Accepted on January 16, 2020

The experimentally observed deviation of memristor's switching voltages at the cycling is considered as a phenomenon of deterministic chaos, and not as a truly random phenomenon. It is assumed that there is a nonlinear dynamics of two phase quantities: one of them is the size of the filament (along the current direction), and the other is intrinsic. We associate it with the small charge accumulated in the filament region. The model does not claim to accurately reproduce sophisticated processes and is presented by Verilog-A description for embedding in CAD.

Keywords: memristive element, MIM-structure, cycling, compact model, non-linear dynamic, deterministic chaos

For citation:

Matushkin I. V., Orlov O. M., Lebedev A. O., Mizginov D. S. Compact Model of Nonlinear Dynamics while the Cycling of a Memristor, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 153–164.

DOI: 10.17587/nmst.22.153-164

References

1. **Maevskij O. V., Pisarev A. D., Busygin A. N.** et al. Logicheskij kommutator i zapominayushchee ustrojstvo na osnove memristivnyh yacheek dlya elektricheskoy principial'noj skhemy nejroprocessora, *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, vol. 2, no. 4, pp. 100–111 (in Russian).
2. **Tarkov M. S.** Realizaciya nejronnoj WTA-seti na memristornom krossbare, *Prikladnaya diskretnaya matematika. Prilozhenie*, 2015, no. 8 (in Russian).
3. **Orlov O. M., Markeev A. M., Zenkevich A. V.** et al. Issledovanie osobennostej elementov energonezavisimoy pamyati FRAM i ReRAM, poluchennyh s ispol'zovaniem metoda atomno-sloevogo osazhdeniya, *Elektronnaya tekhnika. Seriya 3. Mikroelektronika*, 2015, vol. 4 (160), pp. 62–68 (in Russian).
4. **Teplov G. S., Gornev E. S.** Model' na yazyke Verilog-A mnogourovnevnogo bi polyarnogo memristora s uchetom deviacij parametrov pereklyucheniya, *Mikroelektronika*, 2019, vol. 48, no. 3, pp. 163–175 (in Russian).
5. **Simmons J. G., Verderber R. R.** New Conduction and Reversible Memory Phenomena in Thin Insulating Films, *Proc. R. Soc. A.*, 1967, vol. 301, pp. 77–102.
6. **Dearnaley G., Morgan D. V., Stoneham A. M.** A model for filament growth and switching in amorphous oxide films, *J. Non-Cryst. Solids.*, 1970, vol. 4, pp. 593–621.
7. **Chua L.** Memristor—the missing circuit element, *IEEE Transactions on circuit theory*, 1971, vol. 18, no. 5, pp. 507–519.
8. **Strukov D. B., Snider G. S., Steward D. R., Williams R. S.** The missing memristor found, *Nature*, 2008, vol. 453, no. 7191, pp. 80.
9. **Benderli S., Wey T. A.** On SPICE macromodeling of TiO₂ memristors, *Electronics letters*, 2009, vol. 45, no. 7, pp. 377–379.
10. **Emara A. A., Aboudina M. M., Fahmy H. A. H.** Corrected and accurate Verilog-A for linear dopant drift model of memristors, *Circuits and Systems (MWSCAS), 2014 IEEE 57th International Midwest Symposium on. IEEE*, 2014, pp. 499–502.
11. **Kvatinsky S., Filter D., Talisveyberg K.** Models of memristors for SPICE simulations, *Electrical & Electronics Engineers in Israel (IEEEI), 2012 IEEE 27th Convention of. IEEE*, 2012, pp. 1–5.
12. **Joglekar Y. N., Wolf S. J.** The elusive memristor: properties of basic electrical circuits, *European Journal of Physics*, 2009, vol. 30, no. 4, pp. 661.
13. **Prodromakis T., Peh B. P., Papavassiliou C., Tountzou C.** et al. A versatile memristor model with nonlinear dopant kinetics, *IEEE transactions on electronic devices*, 2011, vol. 58, no. 9, p. 3099–3105.
14. **Biolek Z., Biolek D., Biolkova V.** SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift, *Radioengineering*, 2009, vol. 18, no. 2.
15. **Pickett M. D., Strukov D. B., Borghetti Y.** et al. Switching dynamics in titanium dioxide memristive devices, *Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 106, no. 7, pp. 074508.
16. **Kvatinsky S., Friedman E. G., Kolodny A., Weyser U.** et al. TEAM: Threshold adaptive memristor model, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2013, vol. 60, no. 1, pp. 211–221.
17. **Kvatinsky S., Ramadan M., Friedman E. G., Kolodny A.** VTEAM: A general model for voltage-controlled memristors, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2015, vol. 62, no. 8, pp. 786–790.
18. **Lupo N., Bonizzoni E., Perez E.** et al. An Approximated Verilog-A Model for Memristive Devices, *Circuits and Systems (ISCAS), 2018 IEEE International Symposium on. IEEE*, 2018, pp. 1–5.
19. **Yang Y., Yimson M., Rishad S., Dhiraj P.** et al. Verilog-A based effective complementary resistive switch model for simulations and analysis, *IEEE Embedded Systems Letters*, 2014, vol. 6, no. 1, pp. 12–15.
20. **Wang X., Xu B., Chen L.** Efficient memristor model implementation for simulation and application, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2017, vol. 36, no. 7, pp. 1226–1230.
21. **Zeng G., Mohanty S. P., Kougiianos E., Okobiah O.** Polynomial Metamodel integrated Verilog-AMS for memristor-based mixed-signal system design, *Circuits and Systems (MWSCAS), 2013 IEEE 56th International Midwest Symposium on. IEEE*, 2013, pp. 916–919.
22. **Danilin S. N., Shchanikov S. A., Galushkin A. I.** The research of memristor-based neural network components operation accuracy in control and communication systems, *Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference on. IEEE*, 2015, pp. 1–6.
23. **Li G., Mohanty S. P., Kougiianos E., Okobiah O.** Multinomial based memristor modelling methodology for simulations and analysis, *International Journal of Electronics Letters*, 2015, vol. 3, no. 1, pp. 1–12.
24. **Lebedev A. O., Ivanov S. V., Voronov D. D., Orlov O. M.** Issledovanie problem povtoryaemosti i vosproizvodimosti harakteristik yachejki rezistivnoj pamyati na osnove oksida gafniya, *Nanoindustriya*, 2018, vol. 82, no. 9, pp. 234–235 (in Russian).
25. **Mikheev R., Teplov G., Matyushkin I.** Compact Model of Nonlinear Dynamics While the Cycling of a Memristor, 2019 *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 2057–2061. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657191
26. **Pershin Y. V., Slipko V. A.** Dynamical attractors of memristors and their networks, *Europhysics Letters* 125, 20002, 2019.
27. **Pershin Y. V., Slipko V. A.** Bifurcation analysis of a TaO memristor model, *arXiv:1906.01377*, June 2019
28. **Hui Chang, Qinghai Song, Yuxia Li, Zhen Wang and Guanrong Chen.** Unstable Limit Cycles and Singular Attractors in a Two-Dimensional Memristor-Based Dynamic System, *Entropy*, 2019, vol. 21 (4), no. 415; doi.org/10.3390/e21040415
29. **Web-site** of group MEM-Q <http://mem-q.ee.duth.gr/>
30. **Slipko V. A., Pershin Y. V.** Importance of the window function choice for the predictive modelling of memristors, in *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, doi: 10.1109/TCSII.2019.2906295

31. Orlov O., Murashev V., Lebedev A., Orlov V., Ivanov S. Features of the Improving of the HFO2 ReRAM Cells Characteristics Reproducibility, 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) 28–31 Jan., pp.: 2087–2089, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657230

32. Orlov O. M., Gritsenko V. A. Research of features bipolar resistive switching characteristics in Si3N4 based structure, Conference NES2019 — NEW TRENDS INNONEQUILIBRIUM STOCHASTIC MULTISTABLE SYSTEMS AND MEMRISTORS, Book of Abstracts, October 18–21, 2019 ERICE (ITALY), pp. 31–32.

УДК 531.383

DOI: 10.17587/nmst.22.164-171

М. А. Барулина, д-р физ.-мат. наук, зав. лаб., e-mail: marina@barulina.ru
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук (ИПТМУ РАН), г. Саратов

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА НЭМС-ДАТЧИКА КАК ПРЯМОУГОЛЬНОЙ РАЗМЕРНО-ЗАВИСИМОЙ НАНОПЛАСТИНЫ

Поступила в редакцию 31.12.2019

Получены уравнения движения в перемещениях чувствительного элемента наноэлектромеханического датчика в виде прямоугольной размерно-зависимой нанопластины. Наноэлектромеханические датчики — это эволюция микроэлектромеханических датчиков в сторону уменьшения размеров компонентов датчика и расстояний между ними до наноразмеров. Для изучения движения и напряженно-деформированного состояния компонентов НЭМС-датчиков в большинстве случаев неприменимы классические теории и подходы именно ввиду их наноразмеров. В настоящее время для изучения таких объектов разработаны модифицированные теории, например модифицированная теория парных напряжений. Еще одна проблема, которую необходимо принимать во внимание, это сильная зависимость характеристик наночувствительного элемента от ортотропности или анизотропности материала. В работе на основе модифицированной теории парных напряжений получены уравнения движения в перемещениях чувствительного элемента наноэлектромеханического датчика в виде размерно-зависимой ортотропной пластины. Чувствительный элемент рассматривался как прямоугольная пластина, находящаяся под действием распределенной силы. При выводе уравнений использовалась динамическая версия принципа виртуальных перемещений и теория ламинированных композитных пластин и оболочек третьего порядка.

Ключевые слова: наноэлектромеханические системы, математическая модель, элементы датчиков, размерно-зависимые объекты, модифицированная теория парных напряжений

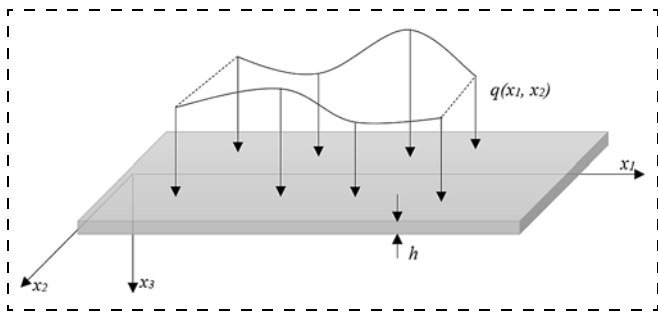
Введение

В настоящее время наблюдается устойчивый интерес как исследователей разных стран, так и индустрии к развитию нанотехнологии и созданию чувствительных элементов и компонентов для точных и высокоточных наноэлектромеханических датчиков различного назначения [1–10].

Одной из важных проблем при разработке чувствительных элементов НЭМС-датчиков является то, что вследствие их малых размеров нельзя использовать те же теории для изучения их динамики, что используются для MEMS-датчиков. При этом, помимо специфичных именно для нанобъектов факторов, влияющих на характеристики датчика, необходимо принимать во вни-

мание и классические факторы, такие как тепловые возмущения, механические вибрации и т. д.

В работах [11–14] показано, что размерные эффекты играют существенную роль для микро- и нанобъектов. В работе [15] экспериментально показано, что безразмерная собственная частота балки увеличивается примерно в 2,1 раза, если ее толщина уменьшается с 15 до 2,1 нм. В работах [16–18] изучалось влияние размерных эффектов на динамику чувствительного элемента нанодатчика. Тем не менее в большинстве работ рассматриваются изотропные пластины или балки. Влияние размерно-зависимых параметров на анизотропные пластины первым рассмотрел Chen W. J. [19–24]. В работе [24] Chen W. J. предложил для изучения таких пластин новую



Нанопластина с системой координат и приложенной нагрузкой

модифицированную теорию парных напряжений, в которой ввел три размерно-зависимых параметра. На основе этой теории и теории изгиба плит Кирхгофа он развил теорию композитных многослойных плит. Но автору неизвестны публикации, посвященные именно ортотропным или анизотропным размерно-зависимым пластинам, учитывающие как новую модифицированную теорию парных напряжений, так и теорию изгиба пластин третьего порядка [25, 26], тогда как рассмотрение в этом направлении необходимо для создания точных или высокоточных НЭМС-датчиков.

Постановка задачи

Рассмотрим прямоугольную ортотропную нанопластину толщиной h (см. рисунок), находящуюся под действием распределенной нагрузки, приложенной на верхнюю грань пластины ($x_3 = -h/2$). Начало системы координат положим в центре левой грани нанопластины. Оси x_1, x_2 направлены по длине и ширине пластины соответственно. Положительное направление оси x_3 — вниз от срединной плоскости по толщине пластины. Таким образом, координаты произвольной точки срединной плоскости имеют вид $(x_1, x_2, 0)$. Плотность ρ_0 пластины принимаем однородной, не изменяющейся по толщине или длине пластины.

Поле перемещений и основные соотношения

Согласно теории пластин третьего порядка [25], перемещение (u_1, u_2, u_3) любой точки P пластины может быть записано в следующем виде:

$$u_1(x_1, x_2, x_3, t) = u_0(x_1, x_2, t) + x_3\phi_1(x_1, x_2, t) - \frac{4}{3h^2}x_3^3\left(\phi_1(x_1, x_2, t) + \frac{\partial w_0(x_1, x_2, t)}{\partial x_1}\right);$$

$$u_2(x_1, x_2, x_3, t) = v_0(x_1, x_2, t) + x_3\phi_2(x_1, x_2, t) - \frac{4}{3h^2}x_3^3\left(\phi_2(x_1, x_2, t) + \frac{\partial w_0(x_1, x_2, t)}{\partial x_2}\right); \quad (1)$$

$$u_3(x_1, x_2, x_3, t) = w_0(x_1, x_2, t),$$

где (u_0, v_0, w_0) — компоненты вектора перемещения точки срединной поверхности по координатным осям (x_1, x_2, x_3) , ϕ_1 и ϕ_2 — углы поворота поперечного сечения пластины, к которому принадлежит точка P , относительно осей x_2 и x_1 соответственно.

Новая модифицированная теория парных напряжений была предложена W. Chen и X. Li [24]. В этой теории вводятся в рассмотрение три размерно-зависимых параметра материала. Основные соотношения между напряжениями и деформациями, согласно этой теории, имеют следующий вид [24]:

$$\sigma_{ij} = \tilde{C}_{ijkl}\varepsilon_{kl}; \quad (2.1)$$

$$m_{ij} = l_i^2 G_i \chi_{ij} + l_j^2 G_j \chi_{ji}; \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}); \quad (2.3)$$

$$\chi_{ij} = \omega_{i,j}; \quad (2.4)$$

$$\omega_i = \frac{1}{2}e_{ijk}u_{k,j}; \quad (2.5)$$

где l_i — размерно зависимый параметр материала; \tilde{C}_{ijkl}, G_i — упругие константы; σ, ε — тензор напряжений и деформаций; χ — тензор кривизны (градиента вращения); m — тензор моментов парных напряжений; u — перемещений; e — символ перестановки (символ Леви—Чивиты).

Из соотношений (2.1)—(2.5) следует, что тензоры $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, m_{ij}$ являются симметричными. Тензор χ_{ij} не будет симметричным, что составляет основное отличие новой модифицированной теории парных напряжений от модифицированной теории парных напряжений.

Запишем компоненты тензора деформаций и напряжений в виде вектора:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{12} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где ε_{ij} и σ_{ij} определяются (2.3) и (2.1) соответственно.

Тогда зависимость (2.1), учитывая ортотропность материала, можно переписать в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{pmatrix}, \quad (3.1)$$

где C_{ij} — тензор упругих постоянных.

Подставляя (1) и (2.3) в (3), получим:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \gamma_{12}^0 \end{pmatrix} + x_3 \begin{pmatrix} \varepsilon_1^1 \\ \varepsilon_2^1 \\ \gamma_{12}^1 \end{pmatrix} + x_3^3 \begin{pmatrix} \varepsilon_1^3 \\ \varepsilon_2^3 \\ \gamma_{12}^3 \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{23}^{(0)} \\ \gamma_{13}^{(0)} \end{pmatrix} + x_3^2 \begin{pmatrix} \gamma_{23}^{(2)} \\ \gamma_{13}^{(2)} \end{pmatrix}, \quad (4.1)$$

где

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1^{(0)} \\ \varepsilon_2^{(0)} \\ \gamma_{12}^{(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{0,1} \\ v_{0,2} \\ u_{0,2} + v_{0,1} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \varepsilon_1^{(1)} \\ \varepsilon_2^{(1)} \\ \gamma_{12}^{(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_{1,1} \\ \phi_{2,2} \\ \phi_{1,2} + \phi_{2,1} \end{pmatrix}, \quad (4.2)$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1^{(3)} \\ \varepsilon_2^{(3)} \\ \gamma_{12}^{(3)} \end{pmatrix} = -c_1 \begin{pmatrix} \phi_{1,1} + w_{0,11} \\ \phi_{2,2} + w_{0,22} \\ \phi_{1,2} + \phi_{2,1} + 2w_{0,12} \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} \gamma_{23}^{(0)} \\ \gamma_{13}^{(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{0,2} + \phi_2 \\ w_{0,1} + \phi_1 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \gamma_{23}^{(2)} \\ \gamma_{13}^{(2)} \end{pmatrix} = -c_2 \begin{pmatrix} \gamma_{23}^{(0)} \\ \gamma_{13}^{(0)} \end{pmatrix}, \quad (4.3)$$

$$c_1 = \frac{4}{3h^2}, \quad c_2 = \frac{4}{h^2} = 3c_1.$$

Аналогичным образом, используя (1), (2.4), (2.5), получаем для компонент χ_{ij} :

$$\begin{pmatrix} \chi_{11} \\ \chi_{22} \\ \chi_{33} \\ \chi_{12} \\ \chi_{21} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \chi_{11}^{(0)} \\ \chi_{22}^{(0)} \\ \chi_{33}^{(0)} \\ \chi_{12}^{(0)} \\ \chi_{21}^{(0)} \end{pmatrix} + \frac{1}{2} x_3^2 c_2 \begin{pmatrix} \chi_{11}^{(2)} \\ \chi_{22}^{(2)} \\ \chi_{33}^{(2)} \\ \chi_{12}^{(2)} \\ \chi_{21}^{(2)} \end{pmatrix}, \quad (5.1)$$

$$\begin{pmatrix} \chi_{13} \\ \chi_{23} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} 2c_2 x_3 \begin{pmatrix} \chi_{13}^{(1)} \\ -\chi_{23}^{(1)} \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} \chi_{31} \\ \chi_{32} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \chi_{31}^{(0)} \\ \chi_{32}^{(0)} \end{pmatrix} + \frac{1}{2} x_3 \begin{pmatrix} \chi_{31}^{(1)} \\ \chi_{32}^{(1)} \end{pmatrix} + \frac{1}{2} c_1 x_3^3 \begin{pmatrix} \chi_{31}^{(3)} \\ \chi_{32}^{(3)} \end{pmatrix}, \quad (5.2)$$

где

$$\begin{pmatrix} \chi_{11}^{(0)} \\ \chi_{22}^{(0)} \\ \chi_{33}^{(0)} \\ \chi_{12}^{(0)} \\ \chi_{21}^{(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{0,12} - \phi_{2,1} \\ -w_{0,12} + \phi_{1,2} \\ \phi_{2,1} - \phi_{1,2} \\ w_{0,22} - \phi_{2,2} \\ -w_{0,11} + \phi_{1,1} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \chi_{11}^{(2)} \\ \chi_{22}^{(2)} \\ \chi_{33}^{(2)} \\ \chi_{12}^{(2)} \\ \chi_{21}^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{0,12} + \phi_{2,1} \\ -w_{0,12} - \phi_{1,2} \\ -\phi_{2,1} + \phi_{1,2} \\ w_{0,22} + \phi_{2,2} \\ -w_{0,11} - \phi_{1,1} \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} \chi_{13}^{(1)} \\ \chi_{23}^{(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{0,2} + \phi_2 \\ w_{0,1} + \phi_1 \end{pmatrix}; \quad (5.3)$$

$$\begin{pmatrix} \chi_{31}^{(0)} \\ \chi_{32}^{(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{0,11} - u_{0,12} \\ -u_{0,22} + v_{0,12} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \chi_{31}^{(1)} \\ \chi_{32}^{(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_{2,11} - \phi_{1,12} \\ \phi_{2,12} - \phi_{1,22} \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} \chi_{31}^{(3)} \\ \chi_{32}^{(3)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\chi_{31}^{(1)} \\ -\chi_{32}^{(1)} \end{pmatrix}. \quad (5.4)$$

Принцип виртуальных перемещений и уравнения движения

Потенциальная энергия U в области V , занятой упруго деформируемым материалом, кинетическая энергия K и работа W внешних сил записываются следующим образом:

$$U = U_\sigma + U_\chi; \quad K = \frac{1}{2} \int_V \rho_0 (\dot{u}_i^2) dV,$$

$$W = \int_\Omega q dx_1 dx_2, \quad (6)$$

где $U_\sigma = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV$ — "классическая" часть потенциальной энергии; $U_\chi = \frac{1}{2} \int_V m_{ij} \chi_{ij} dV$ — размерно-зависимая часть.

Принцип виртуальных перемещений в данном случае может быть записан в виде:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta U - \delta K - \delta W = \int_{t_1}^{t_2} \delta U_\sigma + \delta U_\chi - \delta K - \delta W = 0, \quad (7.1)$$

где δU , δK , δW — вариации потенциальной энергии, кинетической энергии и работы внешних сил, определяющиеся следующими соотношениями:

$$\delta U_{\sigma} = \int_{\Omega} \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_{11}\delta\varepsilon_{11} + \sigma_{22}\delta\varepsilon_{22} + \sigma_{12}\delta\gamma_{12} + \sigma_{13}\delta\gamma_{13} + \sigma_{23}\delta\gamma_{23}) dx_3 dx_1 dx_2; \quad (7.2)$$

$$\delta U_{\chi} = \int_{\Omega} \int_{-h/2}^{h/2} (m_{11}\delta\chi_{11} + m_{22}\delta\chi_{22} + m_{33}\delta\chi_{33} + m_{12}(\delta\chi_{12} + \delta\chi_{21}) + m_{13}(\delta\chi_{13} + \delta\chi_{31}) + m_{23}(\delta\chi_{23} + \delta\chi_{32})) dx_3 dx_1 dx_2; \quad (7.3)$$

$$\delta K = \int_{\Omega} \int_{-h/2}^{h/2} \rho_0(\dot{u}_i \delta \dot{u}_i) dx_3 dx_1 dx_2; \quad (7.4)$$

$$\delta W = \int_{\Omega} q \delta w dx_1 dx_2. \quad (7.5)$$

Подставляя (4.1) в (7.2), (5.1), (5.2) в (7.3), (1) в (7.4), получаем:

$$\delta U_{\sigma} = \int_{\Omega} [N_{11}\delta\varepsilon_1^{(0)} + M_{11}\delta\varepsilon_1^{(1)} + P_{11}\delta\varepsilon_1^{(3)} + N_{22}\delta\varepsilon_2^{(0)} + M_{22}\delta\varepsilon_2^{(1)} + P_{22}\delta\varepsilon_2^{(3)} + N_{12}\delta\gamma_{12}^{(0)} + M_{12}\delta\gamma_{12}^{(1)} + P_{12}\delta\gamma_{12}^{(3)} + N_{13}\delta\gamma_{13}^{(0)} - R_{13}c_2\delta\gamma_{13}^{(0)} + N_{23}\delta\gamma_{23}^{(0)} - R_{23}c_2\delta\gamma_{23}^{(0)}] dx_1 dx_2; \quad (8)$$

$$\delta U_{\chi} = \frac{1}{2} \int_{\Omega} [N_{11}^{\chi}\delta\chi_{11}^{(0)} + c_2 R_{11}^{\chi}\delta\chi_{11}^{(2)} + N_{22}^{\chi}\delta\chi_{22}^{(0)} + c_2 R_{22}^{\chi}\delta\chi_{22}^{(2)} + N_{33}^{\chi}\delta\chi_{33}^{(0)} + c_2 R_{33}^{\chi}\delta\chi_{33}^{(2)} + N_{12}^{\chi}(\delta\chi_{12}^{(0)} + \delta\chi_{21}^{(0)}) + c_2 R_{12}^{\chi}(\delta\chi_{12}^{(2)} + \delta\chi_{21}^{(2)}) + N_{13}^{\chi}\delta\chi_{31}^{(0)} + M_{13}^{\chi}(\delta\chi_{31}^{(1)} + 2c_2\delta\chi_{13}^{(1)}) - c_1 P_{31}^{\chi}\delta\chi_{31}^{(1)} + N_{23}^{\chi}\delta\chi_{32}^{(0)} + M_{23}^{\chi}(\delta\chi_{32}^{(1)} - 2c_2\delta\chi_{23}^{(1)} - c_1 P_{23}^{\chi}\delta\chi_{32}^{(1)})] dx_1 dx_2; \quad (9)$$

$$\delta K = \int_{\Omega} [(I_0\dot{u}_0 + I_1\dot{\phi}_1 - c_1 I_3\dot{\phi}_1)\delta\dot{u}_0 + (I_1\dot{u}_0 + I_2\dot{\phi}_1 - c_1 I_4\dot{\phi}_1)\delta\dot{\phi}_1 + c_1(-I_3\dot{u}_0 - I_4\dot{\phi}_1 + c_1 I_6\dot{\phi}_1)\delta\dot{\phi}_1 + (I_0\dot{v}_0 + I_1\dot{\phi}_2 - c_1 I_3\dot{\phi}_2)\delta\dot{v}_0 + (I_1\dot{v}_0 + I_2\dot{\phi}_2 - c_1 I_4\dot{\phi}_2)\delta\dot{\phi}_2 + c_1(-I_3\dot{v}_0 - I_4\dot{\phi}_2 + c_1 I_6\dot{\phi}_2)\delta\dot{\phi}_2 + I_0\dot{w}_0\delta\dot{w}_0] dx_1 dx_2, \quad (10)$$

где

$$N_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{ij} dx_3, \quad M_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} x_3 \sigma_{ij} dx_3,$$

$$R_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} x_3^2 \sigma_{ij} dx_3, \quad P_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} x_3^3 \sigma_{ij} dx_3,$$

$$N_{ij}^{\chi} = \int_{-h/2}^{h/2} m_{ij} dx_3, \quad M_{ij}^{\chi} = \int_{-h/2}^{h/2} x_3 m_{ij} dx_3,$$

$$R_{ij}^{\chi} = \int_{-h/2}^{h/2} x_3^2 m_{ij} dx_3, \quad P_{ij}^{\chi} = \int_{-h/2}^{h/2} x_3^3 m_{ij} dx_3,$$

$$\varphi_1 = \phi_1 + w_{0,1}, \quad \varphi_2 = \phi_2 + w_{0,2}, \quad l_i = \int_{-h/2}^{h/2} \rho_0 x_3^i dx_3.$$

Подставляя (4.2), (4.3) в (8), (5.3), (5.4) в (10) и интегрируя (7.1) по частям, принимая во внимание (8)–(10), затем собирая коэффициенты при δu_0 , δv_0 , δw_0 , $\delta \phi_1$, $\delta \phi_2$, получаем следующую систему уравнений:

$$N_{11,1} + N_{12,2} + X_u = I_0 \ddot{u}_0 + J_1 \ddot{\phi}_1 - c_1 I_3 \ddot{w}_{0,1}, \\ N_{22,2} + N_{12,1} + X_v = I_0 \ddot{v}_0 + J_1 \ddot{\phi}_2 - c_1 I_3 \ddot{w}_{0,2}, \quad (11)$$

$$(N_{13} - c_2 R_{13})_{,1} + (N_{23} - c_2 R_{23})_{,2} + c_1(P_{11,11} + 2P_{12,12} + P_{22,22}) + q + X_w = I_0 \ddot{w}_0 + c_1 I_3 (\ddot{u}_{0,1} + \ddot{v}_{0,2}) + c_1 J_4 (\ddot{\phi}_{1,1} + \ddot{\phi}_{2,2}) - c_1^2 I_6 (\ddot{w}_{0,12} + \ddot{w}_{0,22}), \\ (M_{11} - c_1 P_{11})_{,1} + (M_{12} - c_1 P_{12})_{,2} - (N_{13} - c_2 R_{13}) + X_{\phi_1} = J_1 \ddot{u}_0 + c_1 \ddot{\phi}_1 - c_1 J_4 \ddot{w}_{0,1}, \\ (M_{22} - c_1 P_{22})_{,2} + (M_{12} - c_1 P_{12})_{,1} - (N_{23} - c_2 R_{23}) + X_{\phi_2} = J_1 \ddot{v}_0 + c_1 \ddot{\phi}_2 - c_1 J_4 \ddot{w}_{0,2},$$

где X_u , X_v , X_w , X_{ϕ_1} , X_{ϕ_2} — слагаемые, которые отличают полученные в данной работе уравнения от "классических" уравнений теории изгиба пластин третьего порядка [25]. Эти слагаемые определяются соотношениями:

$$X_u = \frac{1}{2} N_{23,22}^{\chi} + \frac{1}{2} N_{13,12}^{\chi},$$

$$X_v = -\left(\frac{1}{2} N_{13,11}^{\chi} + \frac{1}{2} N_{23,12}^{\chi}\right),$$

$$X_w = \frac{1}{2} (-K_{1,12} + K_{2,11} - K_{2,22}) + c_2 (M_{13,2}^{\chi} - M_{23,1}^{\chi}),$$

$$X_{\phi_1} = -\frac{1}{2} K_{3,12} - \frac{1}{2} K_{4,22} + \frac{1}{2} K_{5,1} + \frac{1}{2} K_{6,2} + c_2 M_{23}^{\chi}, \quad (12)$$

$$X_{\phi_2} = \frac{1}{2} K_{3,11} + \frac{1}{2} K_{4,12} + \frac{1}{2} K_{7,1} - \frac{1}{2} K_{5,2} - c_2 M_{13}^{\chi}.$$

В уравнениях (11), (12) используются обозначения: $J_i = I_i - c_1 I_{i+2}$, $\kappa = I_2 - 2c_1 I_4 + c_1^2 I_6$,

$$\begin{aligned} K_1 &= N_{11}^\chi - N_{22}^\chi + c_2(R_{11}^\chi - R_{22}^\chi), \\ K_2 &= N_{12}^\chi + c_2 R_{12}^\chi, \quad K_3 = -M_{13}^\chi + c_1 P_{13}^\chi, \\ K_4 &= -M_{23}^\chi + c_2 P_{23}^\chi, \quad K_5 = N_{12}^\chi - c_2 R_{12}^\chi, \\ K_6 &= N_{22}^\chi - N_{33}^\chi + c_2(R_{33}^\chi - R_{22}^\chi), \\ K_7 &= N_{33}^\chi - N_{11}^\chi + c_2(R_{11}^\chi - R_{33}^\chi). \end{aligned}$$

Для краткости записи частная производная по координате обозначена символом "запятая",

например: $N_{11,1} = \frac{\partial N_{11}}{\partial x_1}$, $K_{3,12} = \frac{\partial^2 K_3}{\partial x_1 \partial x_2}$.

Уравнения (11) необходимо дополнить естественными граничными условиями, получаемыми из уравнения

$$\int_{\partial\Omega} \left[\mathcal{H}_1 \delta u_0 + \mathcal{H}_2 \delta v_0 + \mathcal{H}_3 \frac{\partial \delta u_0}{\partial x_2} - \mathcal{H}_3 \frac{\partial \delta v_0}{\partial x_1} + \mathcal{H}_4 \delta w_0 + \mathcal{H}_5 \frac{\partial \delta w_0}{\partial x_1} + \mathcal{H}_6 \frac{\partial \delta w_0}{\partial x_2} + \mathcal{H}_7 \delta \phi_1 + \mathcal{H}_8 \delta \phi_2 + \mathcal{H}_9 \frac{\partial \delta \phi_1}{\partial x_2} - \mathcal{H}_9 \frac{\partial \delta \phi_2}{\partial x_1} \right] d\omega = 0, \quad (13)$$

где $\partial\Omega$ — кусочно-гладкая граница Ω ; $d\omega$ — мера на $\partial\Omega$; n — внешняя нормаль к $\partial\Omega$; n_i — координаты к нормали,

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_1 &= N_{11} n_1 + N_{12} n_2 + \frac{1}{2}(N_{13,1}^\chi n_2 + N_{23,2}^\chi n_2), \\ \mathcal{H}_2 &= N_{12} n_1 + N_{22} n_2 + \frac{1}{2}(-N_{13,1}^\chi n_1 - N_{23,2}^\chi n_1), \\ \mathcal{H}_3 &= \frac{1}{2}(-N_{13}^\chi n_1 - N_{23}^\chi n_2), \\ \mathcal{H}_4 &= (c_1(P_{11,1} + P_{12,2}) + N_{13} - c_2(R_{13} + B_{23}) - \\ &\quad - \frac{1}{4}(K_{1,2} - 2K_{2,1}))n_1 + (c_1(P_{22,2} + P_{12,1}) + \\ &\quad + N_{23} - c_2(R_{23} - B_{13}) - \frac{1}{4}(K_{1,1} + 2K_{2,2}))n_2 - \\ &\quad - (c_1 I_3 \ddot{u}_0 + c_1 J_4 \ddot{\phi}_1 - c_1^2 I_6 \ddot{w}_{0,1})n_1 - \\ &\quad - (c_1 I_3 \ddot{v}_0 + c_1 J_4 \ddot{\phi}_2 - c_1^2 I_6 \ddot{w}_{0,2})n_2, \\ \mathcal{H}_5 &= \left(-\left(c_1 P_{11} + \frac{1}{2} K_2\right)n_1 - \left(c_1 P_{12} - \frac{1}{4} K_1\right)n_2\right), \\ \mathcal{H}_6 &= \left(-\left(c_1 P_{12} + \frac{1}{4} K_1\right)n_1 - \left(c_1 P_{22} - \frac{1}{2} K_2\right)n_2\right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_7 &= (M_{11} - c_1 P_{11})n_1 + (M_{12} - c_1 P_{12})n_2 + \\ &\quad + \frac{1}{2}(K_5 n_1 + (-K_{3,1} - K_{4,2} + K_6)n_2), \\ \mathcal{H}_8 &= (M_{22} - c_1 P_{22})n_2 + (M_{12} - c_1 P_{12})n_1 + \\ &\quad + \frac{1}{2}((K_{3,1} + K_{4,2} + K_7)n_1 - K_5 n_2), \\ \mathcal{H}_9 &= \frac{1}{2}(K_3 n_1 + K_4 n_2). \end{aligned}$$

Уравнения движения в перемещениях

Подставляя (1), (2.1)—(2.5) в (11), (12), получаем следующую систему уравнений в перемещениях для размерно-зависимой прямоугольной пластины:

$$\begin{aligned} (-a_1)u_{0,2222} + (-a_1)u_{0,1122} + a_1 v_{0,1112} + a_1 v_{0,1222} + \\ + hC_{11}u_{0,11} + hC_{44}u_{0,22} + h(C_{12} + C_{44})v_{0,12} = \\ = I_0 \ddot{u}_0 + J_1 \ddot{\phi}_1 - c_1 I_3 \ddot{w}_{0,1}; \\ a_1 v_{0,1111} + a_1 v_{0,1122} + (-a_1)u_{0,1112} + (-a_1)u_{0,1222} + \\ + hC_{44}v_{0,11} + hC_{22}v_{0,22} + h(C_{12} + C_{44})u_{0,12} = \\ = I_0 \ddot{v}_0 + J_1 \ddot{\phi}_2 - c_1 I_3 \ddot{w}_{0,2}; \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_1^w w_{0,1111} + a_2^w w_{0,2222} + a_3^w w_{0,1122} + a_4^w w_{0,11} + \\ + a_4^w w_{0,22} + a_4^w \phi_{1,1} + a_5^w \phi_{2,2} + a_6^w \phi_{1,111} + \\ + a_7^w \phi_{2,222} + a_8^w \phi_{1,122} + a_9^w \phi_{2,112} + q = \\ = I_0 \ddot{w}_0 + c_1 I_3 (\ddot{u}_{0,1} + \ddot{v}_{0,2}) + c_1 I_4 (\ddot{\phi}_{1,1} + \ddot{\phi}_{2,2}) - \\ - c_1^2 I_6 (\ddot{w}_{0,11} + \ddot{w}_{0,22}); \\ (-a_1^\phi) \phi_{1,2222} + (-a_2^\phi) \phi_{1,1122} + a_2^\phi \phi_{2,1112} + \\ + a_1^\phi \phi_{2,1222} + a_3^\phi \phi_{1,11} + a_4^\phi \phi_{1,22} + a_5^\phi \phi_{2,12} + \\ + a_6^\phi \phi_1 + a_7^\phi w_{0,111} + a_8^\phi w_{0,122} + a_6^\phi w_{0,1} = \\ = J_1 \ddot{u}_0 + \kappa \ddot{\phi}_1 - c_1 J_4 \ddot{w}_{0,1}; \\ a_2^\phi \phi_{1,1112} + a_1^\phi \phi_{1,1222} + (-a_2^\phi) \phi_{2,1111} + \\ + (-a_1^\phi) \phi_{2,1122} + a_9^\phi \phi_2 + a_{10}^\phi \phi_{2,11} + a_{11}^\phi \phi_{2,22} + \\ + a_{12}^\phi \phi_{1,12} + a_{13}^\phi w_{0,222} + a_{14}^\phi w_{0,112} + a_{15}^\phi w_{0,2} = \\ = J_1 \ddot{v}_0 + \kappa \ddot{\phi}_2 - c_1 J_4 \ddot{w}_{0,2}, \end{aligned}$$

где $a_1 = \frac{h\xi_3}{4}$, $a_1^w = -\frac{h^3 R_{11}^\chi}{252} - \frac{d_1 \xi_2}{2}$,

$$a_2^w = \left(-\frac{h^3 R_{22}^\chi}{252} - \frac{d_1 \xi_1}{2}\right),$$

$$a_3^w = -\frac{h^3(R_{12}^x + 2R_{44}^x)}{126} - \frac{d_1(\xi_1 + \xi_2)}{2},$$

$$a_4^w = \frac{2hR_{66}^x}{3} - \frac{8c_2\xi_2}{3h}, a_5^w = \frac{2hR_{55}^x}{3} + \frac{8c_2\xi_1}{3h},$$

$$a_6^w = \left(\frac{4h^3R_{11}^x}{315} + \frac{d_2\xi_2}{2}\right), a_7^w = \left(\frac{4h^3R_{22}^x}{315} + \frac{d_2\xi_1}{2}\right),$$

$$a_8^w = \frac{4h^3(R_{12}^x + 2R_{44}^x)}{315} + \frac{d_2\xi_2}{2},$$

$$a_9^w = \frac{4h^3(R_{12}^x + 2R_{44}^x)}{315} + \frac{d_2\xi_1}{2}, a_1^{\phi} = \frac{d_6\xi_3}{2},$$

$$a_2^{\phi} = \frac{17h^3\xi_3}{1260}, a_3^{\phi} = \frac{17h^3R_{11}^x}{315} - \frac{d_4\xi_2}{2},$$

$$a_4^{\phi} = \frac{17h^3R_{44}^x}{315} - \frac{15d_5\xi_2 - 30d_4(\xi_3 + \xi_2) + 4h\xi_3}{30},$$

$$a_5^{\phi} = \frac{17h^3(R_{12}^x + 2R_{44}^x)}{315} -$$

$$- \frac{15d_5\xi_1 + 15d_4(\xi_1 + \xi_3) - 4h\xi_3}{30},$$

$$a_6^{\phi} = \frac{8c_2\xi_2}{3h} - \frac{8hR_{66}^x}{15}, a_7^{\phi} = -\frac{4h^3R_{11}^x}{315} - \frac{d_3\xi_2}{2},$$

$$a_8^{\phi} = -\frac{4h^3(R_{12}^x + 2R_{44}^x)}{315} -$$

$$- \frac{d_3(2\xi_2 - \xi_1) + d_3(\xi_1 + \xi_2)}{2},$$

$$a_9^{\phi} = -\frac{8hR_{55}^x}{15} - \frac{8c_2\xi_1}{3h},$$

$$a_{10}^{\phi} = \frac{17h^3R_{44}^x}{315} + \frac{15d_5\xi_1 + 30d_4(\xi_3 + \xi_2) - 4h\xi_3}{30},$$

$$a_{11}^{\phi} = \frac{17h^3R_{22}^x}{315} + \frac{d_4\xi_1}{2},$$

$$a_{12}^{\phi} = \left(\frac{17h^3(R_{12}^x + 2R_{44}^x)}{315} + \right.$$

$$\left. + \frac{15d_5\xi_2 - 15d_4(\xi_2 + 2\xi_3) + 4h\xi_3}{30}\right),$$

$$a_{13}^{\phi} = -\frac{4h^3R_{22}^x}{315} - \frac{d_3\xi_1}{2},$$

$$a_{14}^{\phi} = -\frac{4h^3(R_{12}^x + 2R_{44}^x)}{315} +$$

$$+ \frac{d_5(\xi_1 + \xi_2) - d_3(2\xi_1 - \xi_2)}{2},$$

$$a_{15}^{\phi} = -\frac{8c_2\xi_1}{3h} - \frac{8hR_{55}^x}{15},$$

$$d_1 = \frac{2(5h^2 + 8)}{15h}, d_2 = \frac{2(5h^2 - 8)}{15h}, d_3 = \frac{5h^2 + 4}{15h},$$

$$d_4 = \frac{5h^2 - 4}{15h}, d_5 = -\frac{32}{15h}, d_6 = \frac{17h^3}{630}, \xi_i = L_i R_{ii}^x.$$

Заключение

В работе получены уравнения движения в перемещениях размерно-зависимой пластины на основе новой модифицированной теории парных напряжений и теории изгиба пластин третьего порядка. Учет размерно-зависимых параметров, с одной стороны, усложняет полученную систему уравнений движения, а с другой стороны, не приводит к принципиальному изменению ее вида, что позволяет для решения полученных уравнений использовать методы и подходы, разработанные в механике для изучения движения макроразмерных пластин. Полученные в работе уравнения движения позволят изучить динамику чувствительных элементов нанодатчиков с учетом наноразмерных эффектов и ортотропности материала, что, в свою очередь, может приблизить создание и широкое распространение НЭМС-датчиков.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-08-00807.

Список литературы

1. **Абрамов И. И.** Перспективы использования нанoeлектроники, наноматериалов и нанотехнологий в исследовании и медицине мозга человека // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 1. С. 49–64.
2. **Касаткин С. И., Васильева Н. П., Муравьев А. М.** и др. Магниторезистивные наноэлементы и приборы на их основе // Датчики и системы. 2008. № 4. С. 6–9.
3. **Белозубов Е. М., Васильев В. А.** Нано- и микро-электромеханические системы тонкопленочных датчиков давления. Принципы построения и перспективы исследований // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 9. С. 26–32.
4. **Melikhov I. F., Popov I.** Asymptotic analysis of thin viscous plate model // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2018. Vol. 9 (4). P. 447–456.
5. **Ezhenkova S. I.** Mathematical modeling of sedimentation of nanoparticles in the vessel of finite depth // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2018. Vol. 8 (2). P. 236–238.
6. **Лурье С. А., Миронов Ю. М., Нелюб В. А., Бородулин А. С., Чуднов И. В., Буянов И. А., Соляев Ю. О.** Моделирование зависимостей физико-механических характеристик от параметров микро- и наноструктуры полимерных композиционных материалов // Наука и об-

разование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2012. № 6. С. 37–60.

7. **Binbin Liang, Long Zhang, Binglei Wang, Shenjie Zhou.** A variational size-dependent model for electrostatically actuated NEMS incorporating nonlinearities and Casimir force, *Physica E* 71 (2015) 21–30.

8. **Berman D., Krim J.** Surface science, MEMS and NEMS: progress and opportunities for surface science research performed on, or by, microdevices // *Prog. Surf. Sci.* 2013. Vol. 88. P. 171–211.

9. **Zhang W.-M., Yan H., Peng Z.-K., Meng G.** Electrostatic pull-in instability in MEMS / NEMS: A review *Sens. Actuators A: Physical*. 2014. Vol. 214. P. 187–218.

10. **Раткин Л. С.** Нано- и микротехника для лазерной индустрии // *Нано- и микросистемная техника*. 2011. № 10. С. 47–54.

11. **Fleck N. A., Muller G. M., Ashby M. F., Hutchinson J. W.** Strain gradient plasticity: theory and experiment // *Acta Metallurgica et Materialia*. 1994. Vol. 42. P. 475–487.

12. **Ma Q., Clarke D. R.** Size dependent hardness of silver single crystals // *Journal of Materials Research*. 1995. Vol. 10. P. 853–863.

13. **McFarland A. W., Colton J. S.** Role of material microstructure in plate stiffness with relevance to microcantilever sensors // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2005. Vol. 15. P. 1060–1067.

14. **Li Z., He Y., Lei J., Guo S., Liu D., Wang L.** A standard experimental method for determining the material length scale based on modified couple stress theory // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018. Vol. 141. P. 198–205.

15. **Lu L., Guo X. and Zhao J.** A unified size-dependent plate model based on nonlocal strain gradient theory including surface effects. *Applied Mathematical Modelling*. 2019. Vol. 68. P. 583–602.

16. **Ebrahimi F., Barati M. R.** Hygrothermal effects on vibration characteristics of viscoelastic FG nanobeams based on nonlocal strain gradient theory // *Composite Structures*. 2017. Vol. 159. P. 433–444.

17. **Tsiatas G. C., Yiotis A. J.** Size effect on the static, dynamic and buckling analysis of orthotropic Kirchhoff-type skew micro-plates based on a modified couple stress theory: comparison with the nonlocal elasticity theory // *Acta Mechanica*. 2014. Vol. 226, N. 4. P. 1267–1281. Doi: 10.1007/s00707-014-1249-3

18. **Yang Z., He D.** Vibration and Buckling of Functionally Graded Sandwich Micro-Plates based on a new Size-Dependent Model // *International Journal of Applied Mechanics*. 2019. Doi: 10.1142/s1758825119500042

19. **Chen W. J., Li L., Ma X.** A modified couple stress model for bending analysis of composite laminated beams with first order shear deformation // *Composite Structures*. 2011. Vol. 93. P. 2723–2732.

20. **Chen W. J., Chen W., Sze K. Y.** A model of composite laminated Reddy beam based on a modified couple stress theory // *Composite Structures*. 2012. Vol. 94. P. 2599–2609.

21. **Chen W., Ma X., Li L.** A model of composite laminated Reddy plate based on new modified couple stress theory // *Composite Structures*. 2012. Vol. 94. P. 2143–2156.

22. **Chen W. J., Li X.** Size-dependent free vibration analysis of composite laminated Timoshenko beam based on new modified couple stress theory // *Archive of Applied Mechanics*. 2013. Vol. 83. P. 431–444.

23. **Chen W. J., Si J.** A model of composite laminated beam based on the global–local theory and new modified couple stress theory // *Composite Structures*. 2013. Vol. 9. P. 99–107.

24. **Chen W., Li X.** A new modified couple stress theory for anisotropic elasticity and microscale laminated Kirchhoff plate model // *Archive of Applied Mechanics*. 2013. Vol. 3, N. 84. P. 323–341.

25. **Reddy J. N.** *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells, Theory and Analysis*. 2nd edn. CRC Press, Boca Raton, 2006.

26. **Шереметьев М. П., Пелех Б. Л.** К построению уточненной теории пластин // *Инж. журнал*. 1964. Т. 4. Вып. 3. С. 504–509.

M. A. Barulina, D. Sc., Head of laboratory, marina@barulina.ru,
Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences (IPTMU RAS),
Saratov, Russian Federation

Corresponding author:

Barulina Marina A., Doctor of Physical and Mathematical sciences, Head of Laboratory, Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences (IPTMU RAS), Saratov, Russian Federation.
E-mail: marina@barulina.ru

Equations of Motion of a NEMS-sensor's Sensing Element as Rectangular Size-Dependent Nanoplate

Received on December 31, 2019

Accepted on January 16, 2020

In this work, equations of motion terms of displacements of a sensing element of a nanoelectromechanical sensor are obtained. Nanoelectromechanical sensors are the next step of the evolution of microelectromechanical sensors in the direction of reducing the size of the components of the sensor and the distance between them to nanoscale. Classical theories and approaches for study the motion and stress-strain state of components of NEMS sensors, in most cases, are inapplicable precisely because of their nanoscale dimensions. Currently, for the study of such objects, modified theories have been developed, for example, a new modified couple stress theory. Another problem is that the strong dependence of the characteristics of the nano-sensitive element on the orthotropy or anisotropy of the material must be taken into account.

Based on the new modified couple stress theory, equations of motion of a sensitive element of a nanoelectromechanical sensor were obtained in the terms of displacements. The sensitive element was considered as an orthotropic rectangular side-dependent plate under a distributed force. The equations were derived using the dynamic version of the principle of virtual displacements and the third-order theory of laminated composite plates and shells. The obtained equations were compared with the equations of the plate's motion based on the third-order theory.

Keywords: nanoelectromechanical systems, mathematical model, sensor elements, size-dependent objects, modified theory of pair stresses

For citation:

Barulina M. A. Equations of Motion of a NEMS-sensor's Sensing Element as Rectangular Size-Dependent Nanoplate, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 164–171.

DOI: 10.17587/nmst.22.164-171

References

1. **Abramov I. I.** Prospects of Nanoelectronics, Nanomaterials and Nanotechnologies in Research and Medicine of the Human Brain, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 58–64 (in Russian).
2. **Kasatkin S. I., Vasilieva N. P., Muraviov A. M., et al.** Magneto-resistive nanoelements and the instruments on their basis, *Sensors & Systems*, 2008, no. 4, pp. 6–9.
3. **Belozubov E. M., Vasiljev V. A.** Nano- and microelectromechanical systems of thin-film gauges of pressure. The principles of building and prospects of researches // *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2009, no. 9, pp. 26–32.
4. **Melikhov I. F., Popov I.** Asymptotic analysis of thin viscous plate model, *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2018, no. 9 (4), pp. 447–456.
5. **Ezhenkova S. I.** Mathematical modeling of sedimentation of nanoparticles in the vessel of finite depth, *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2018, vol. 8 (2), pp. 236–238.
6. **Lur'e S. A., Mironov Ju. M., Neljub V. A., Borodulin A. S., Chudnov I. V., Bujanov I. A., Soljaev Ju. O.** Modelirovanie zavisimostej fiziko-mehanicheskikh karakteristik ot parametrov mikro- i nanostrukturnykh polimernykh kompozitsionnykh materialov, *Nauka i obrazovanie: Nauchnoe izdanie MGTU im. N. Je. Bauman*. 2012, no. 6, pp. 37–60.
7. **Binbin Liang, Long Zhang, Binglei Wang, Shenjie Zhou.** A variational size-dependent model for electrostatically actuated NEMS incorporating nonlinearities and Casimir force, *Physica E*, 2015, vol. 71, pp. 21–30.
8. **Berman D., Krim J.** Surface science, MEMS and NEMS: progress and opportunities for surface science research performed on, or by, microdevices *Prog. Surf. Sci.* 2013, vol. 88, pp. 171–211.
9. **Zhang W.-M., Yan H., Peng Z.-K., Meng G.** Electrostatic pull-in instability in MEMS/NEMS, *A review Sens. Actuators A: Physical*, 2014, vol. 214, pp. 187–218.
10. **Ratkin L. S.** Nano- and microtechnology for the laser industry, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2011, no. 10, pp. 47–54.
11. **Fleck N. A., Muller G. M., Ashby M. F., Hutchinson J. W.** Strain gradient plasticity: theory and experiment, *Acta Metallurgica et Materialia*, 1994, vol. 42, pp. 475–487.
12. **Ma Q., Clarke D. R.** Size dependent hardness of silver single crystals, *Journal of Materials Research*, 1995, vol. 10, pp. 853–863.
13. **McFarland, A. W., Colton, J. S.** Role of material microstructure in plate stiffness with relevance to microcantilever sensors, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, vol. 15, pp. 1060–1067.
14. **Li Z., He Y., Lei J., Guo S., Liu D., Wang L.** A standard experimental method for determining the material length scale based on modified couple stress theory, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, vol. 141, pp. 198–205.
15. **Lu L., Guo X., Zhao J.** A unified size-dependent plate model based on nonlocal strain gradient theory including surface effects, *Applied Mathematical Modelling*, 2019, vol. 68, pp. 583–602.
16. **Ebrahimi F., Barati M. R.** Hygrothermal effects on vibration characteristics of viscoelastic FG nanobeams based on nonlocal strain gradient theory, *Composite Structures*, 2017, vol. 159, pp. 433–444.
17. **Tsiatas G. C., Yiotis A. J.** Size effect on the static, dynamic and buckling analysis of orthotropic Kirchhoff-type skew micro-plates based on a modified couple stress theory: comparison with the nonlocal elasticity theory, *Acta Mechanica*, 2014, no. 4, vol. 226, pp. 1267–1281. Doi: 10.1007/s00707-014-1249-3
18. **Yang Z., He D.** Vibration and Buckling of Functionally Graded Sandwich Micro-Plates based on a new Size-Dependent Model, *International Journal of Applied Mechanics*, 2019. Doi: 10.1142/s1758825119500042
19. **Chen W. J., Li L., Ma X.** A modified couple stress model for bending analysis of composite laminated beams with first order shear deformation, *Composite Structures*, 2011, vol. 93, pp. 2723–2732.
20. **Chen W. J., Chen W., Sze K. Y.** A model of composite laminated Reddy beam based on a modified couple stress theory, *Composite Structures*, 2012, vol. 94, pp. 2599–2609.
21. **Chen W., Ma X., Li L.** A model of composite laminated Reddy plate based on new modified couple stress theory, *Composite Structures*, 2012, vol. 94, pp. 2143–2156.
22. **Chen W. J., Li X.** Size-dependent free vibration analysis of composite laminated Timoshenko beam based on new modified couple stress theory, *Archive of Applied Mechanics*, 2013, vol. 83, pp. 431–444.
23. **Chen W. J., Si J.** A model of composite laminated beam based on the global–local theory and new modified couple stress theory, *Composite Structures*, 2013, no. 9, pp. 99–107.
24. **Chen W., Li X.** A new modified couple stress theory for anisotropic elasticity and microscale laminated Kirchhoff plate model, *Archive of Applied Mechanics*, 2013, no. 3, vol. 84, pp. 323–341.
25. **Reddy J. N.** *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells, Theory and Analysis*. 2nd edn. CRC Press, Boca Raton, 2006.
26. **Sheremet'ev M. P., Peleh B. L.** To the construction of a refined theory of plates (K postroeniju utocnenoj teorii plastin). *Inzh. zhurnal*. 1964, vol. 4, no. 3, pp. 504–509 (in Russian).

А. А. Кулакова, канд. техн. наук, мл. науч. сотр., e-mail: anastasya.staryh@mail.ru, Инжиниринговый центр приборостроения, радио- и микроэлектроники Южного федерального университета, г. Таганрог,
Е. Б. Лукьяненко, канд. техн. наук, доц., e-mail: luk101010@mail.ru, г. Таганрог

ОПТИМИЗИРОВАННЫЕ ТРИГГЕРНЫЕ СХЕМЫ НА ЛОГИЧЕСКИХ КМОП-ЭЛЕМЕНТАХ

Поступила в редакцию 09.01.2020

Рассмотрены оптимизированные триггерные схемы на логических КМОП-элементах. Приведена методика минимизации уравнений триггеров и синтез триггеров на их основе. На основе схемотехнического моделирования проведено сравнение синтезированных и классических схем триггеров. Показано преимущество синтезированных схем триггеров по энергоэффективности.

Ключевые слова: RS-, D-, JK-триггеры, таблица истинности, карта Карно, синтез схем, схемотехническое моделирование, энергоэффективность

Введение

Цифровая схемотехника базируется на ряде стандартных конфигураций триггерных схем [1, 2], которые не являются оптимальными ни по числу транзисторов, ни по энергоэффективности. Можно оптимизировать схемное построение различного типа триггеров и получить выигрыш по ряду параметров.

Статические RS-триггеры

Рассмотрим метод оптимизации RS-триггера на примере статического E-триггера. Функционирование триггера показано в табл. 1.

Из таблицы находим уравнение для выходного сигнала Q^{n+1} в виде суммы минтермов:

$$Q^{n+1} = \bar{S} \bar{R} Q + S \bar{R} + SRQ.$$

Для оптимизации уравнения занесем его на карту Карно (рис. 1).

Из карты Карно получим минимизированное уравнение E-триггера:

$$Q^{n+1} = S \bar{R} + Q(S + \bar{R}).$$

Таблица 1

Таблица истинности статического E-триггера

S	R	Q^{n+1}
0	0	Q
0	1	0
1	0	1
1	1	Q

Взяв двойную инверсию правой части уравнения и сомножителя $(S + \bar{R})$, получим

$$Q^{n+1} = \overline{\overline{S \bar{R}} \cdot \overline{Q(S + \bar{R})}}. \quad (1)$$

Используя стандартные логические КМОП-элементы, синтезируем по уравнению (1) схему E-триггера (рис. 2).

Формирование выходного сигнала Q^{n+1} по формуле (1) показано на рис. 1.

Другой разновидностью статических триггеров является RS-триггер с прямыми входами. Функционирует он, согласно табл. 1, только при $S = R = 1$. Примем значение выходного сигнала Q^{n+1} равным нулю (R-триггер) для исключения неопределенного состояния. Минимизируя уравнение R-триггера с помощью карт Карно, получим

$$Q^{n+1} = \bar{R}(Q + S).$$

Возьмем двойную инверсию от правой части уравнения:

$$Q^{n+1} = \overline{\overline{R + (Q + S)}}.$$

Схема, синтезированная по этому уравнению, приведена на рис. 3.

Проверку схем на функционирование и измерение их параметров проводили путем моделирования в САПР OrCAD. В качестве критерия энергоэффективности использовали параметр $L = A \cdot N$ [3, 4], где A — работа переключения; N — число транзисторов в схеме. При моделиро-

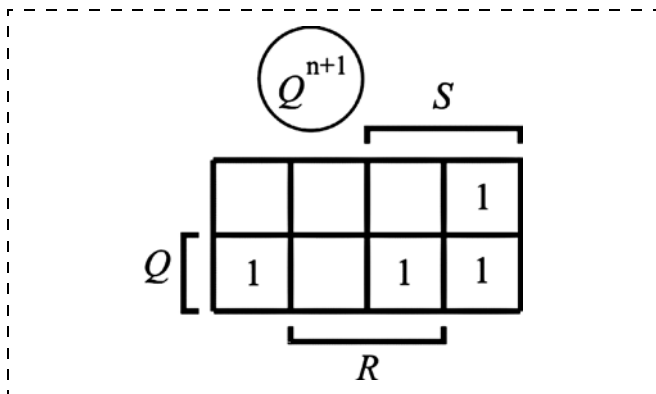


Рис. 1. Карта минтермов *E*-триггера

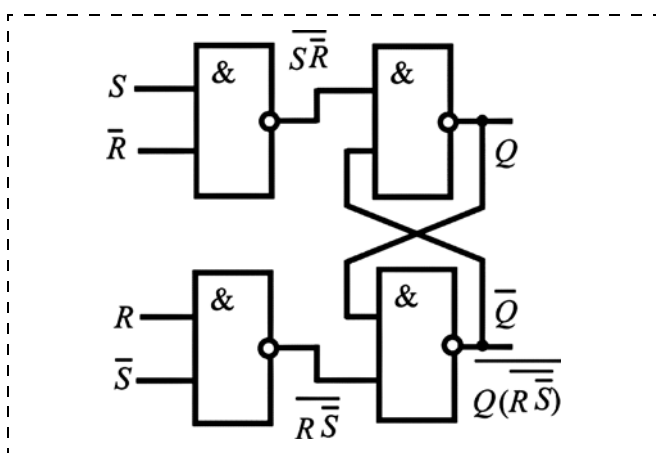


Рис. 2. Схема *E*-триггера

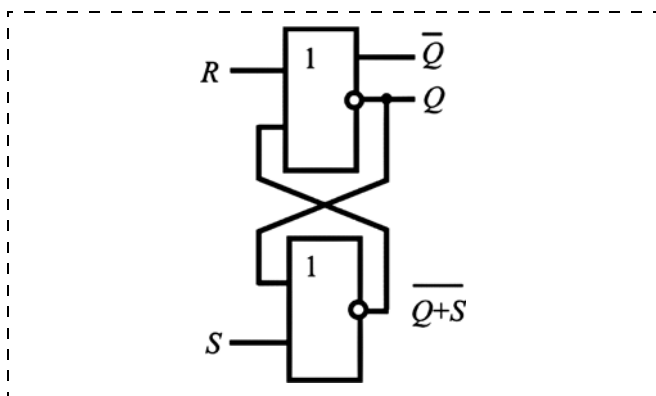


Рис. 3. Схема *R*-триггера

вании использованы модели МОП-транзисторов четвертого поколения (BSIM4). Подробные сведения о моделях МОП-транзисторов можно получить из работы [5]. Конструктивно МОП-транзисторы выполнены по технологии 0,18 мкм. Топологические размеры МОП-транзисторов рассчитаны по методике, изложенной в работе [6]. Напряжение питания схем равно 3,3 В. Длительность состояний триггеров выбрана равной 10 нс.

Параметры рассмотренных схем сравнивали с параметрами классических схем, приведенных в работах [7, 8], они показаны в табл. 2.

Как видно из табл. 2, число транзисторов меньше в синтезированных схемах на 20 и 17 % соответственно, а энергоэффективность выше в 1,6–1,8 раза.

D-триггер с динамическим управлением

Состояния синхронного статического *D*-триггера описываются таблицей истинности (табл. 3).

Из табл. 3 записываем уравнение *D*-триггера:

$$Q^{n+1} = \bar{C}\bar{d}Q + \bar{C}dQ + Cd.$$

Оптимизированный выходной сигнал равен

$$Q^{n+1} = Cd + Q\bar{C}. \quad (2)$$

Преобразуя уравнение (2), можно получить различные схемные решения *D*-триггера. При этом надо преобразовывать так, чтобы тактовый сигнал *C* входил в уравнение или в прямом, или в инверсном виде. В противном случае вследствие временных сдвигов между сигналами *C* и \bar{C} могут возникать сбои в работе схемы.

Реализуем динамическое управление с помощью двухступенчатого триггера. В целях упрощения схемы каждую ступень найдем индивидуально. Для первой ступени *D*-триггера возьмем двойную инверсию от второго слагаемого ($Q\bar{C}$). Получим

$$Q^{n+1} = Cd + \overline{(\bar{Q} + C)}. \quad (3)$$

Таблица 2

Параметры *RS*-триггеров

Параметры	<i>E</i> -триггер		<i>RS</i> -триггер с прямыми входами	
	Синтезированная схема	Классическая схема	Синтезированная схема	Классическая схема
<i>A</i> , пДж	0,0024	0,0035	0,00047	0,00062
<i>N</i> , шт.	16	20	10	12
<i>L</i> , пДж · шт.	0,038	0,070	0,0047	0,0074

Таблица 3

Таблица истинности *D*-триггера

<i>C</i>	<i>d</i>	Q^{n+1}
0	0	\bar{Q}
0	1	\bar{Q}
1	0	0
1	1	1

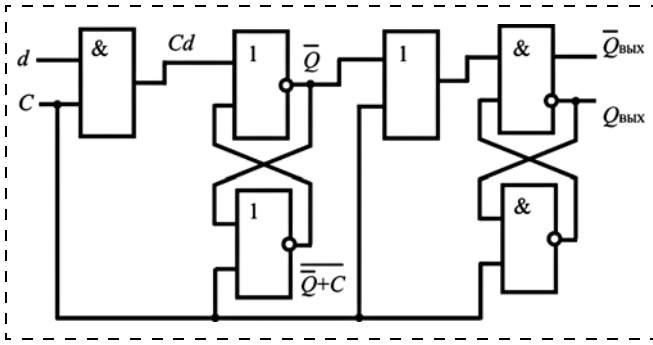


Рис. 4. Схема *D*-триггера с динамическим управлением

Для второй ступени *D*-триггера возьмем двойную инверсию от первого слагаемого уравнения (2) и всего выражения в правой части. Получим

$$Q^{n+1} = \overline{(\bar{C} + d) \cdot (\bar{Q} \cdot \bar{C})}. \quad (4)$$

Двухступенчатый *D*-триггер, синтезированный по уравнениям (3), (4), представлен на рис. 4.

Отличительной особенностью схемы является отсутствие инверсного тактового сигнала.

Параметры синтезированной схемы *D*-триггера и *D*-триггера, выполненного классическим методом, приведены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, разработанный *D*-триггер содержит на 21 % меньше транзисторов и по энергоэффективности превосходит классический *D*-триггер в 2,1 раза.

RS-триггер с динамическим управлением

Неопределенное состояние классического *RS*-триггера, возникающее при $S = R = 1$, заменим на значение, равное 0 (*R*-триггер). Тогда таблица истинности триггера примет вид, показанный в табл. 5.

Из табл. 5 получим уравнение *R*-триггера:

$$Q^{n+1} = \bar{C}Q + C\bar{S}\bar{R}Q + CS\bar{R}.$$

Минимизируя уравнение с помощью карт Карно, находим

$$Q^{n+1} = Q(\bar{C} + \bar{R}) + CS\bar{R}.$$

Взяв двойную инверсию от сомножителя $(\bar{C} + \bar{R})$ и от правой части уравнения, получим

$$Q^{n+1} = \overline{\overline{Q(\bar{C} + \bar{R}) \cdot CS\bar{R}}}.$$

Это уравнение описывает первую ступень триггера. В качестве второй ступени используем схему *D*-триггера, реализованную блочным методом [9]. Получаем двухступенчатый *R*-триггер (рис. 5).

Триггер работает следующим образом. При $C = 1$ входные информационные сигналы записываются на выход *Q* первой ступени. Вторая ступень находится в режиме хранения предыдущего сигнала, так как транзисторы *V2*, *V3* закрыты, а *V6*, *V7* открыты и сигнал защелкивается в триггере по цепям *D1*, *V5* или *D1*, *V8*. При $C = 0$ первая ступень переходит в режим хранения, а вторая ступень записывает сигнал *Q*.

Сравнительные характеристики *RS*-триггеров приведены в табл. 6.

Разработанный триггер имеет более высокую энергоэффективность (в 2,1 раза) и имеет меньшее число транзисторов (на 12 %).

JK-триггер

JK-триггер нашел широкое распространение благодаря своей универсальности. Функционирование триггера показано в табл. 7.

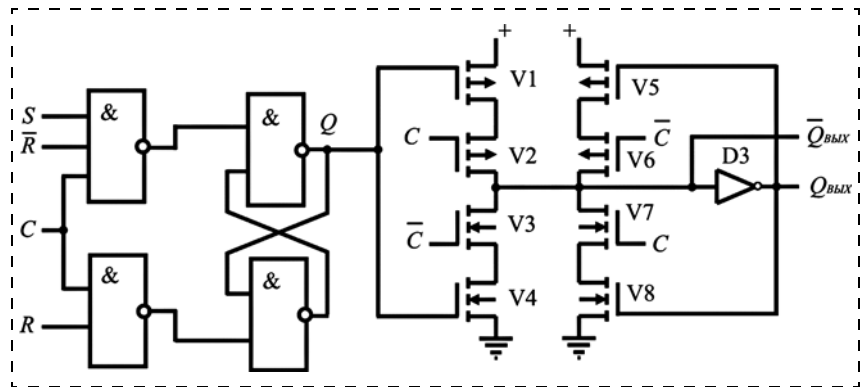


Рис. 5. Схема двухступенчатого *RS*-триггера

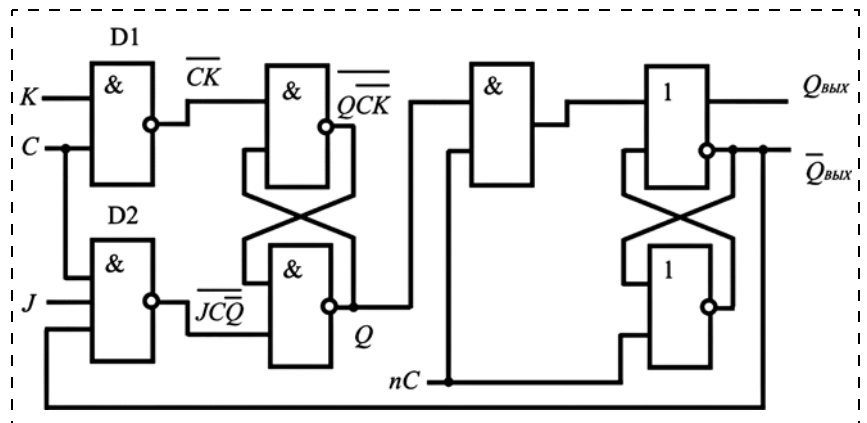


Рис. 6. Схема *JK*-триггера

Из табл. 7 запишем уравнение функционирования JK -триггера:

$$Q^{n+1} = \bar{C}Q + CQ\bar{J}\bar{K} + CJ\bar{K} + CJK\bar{Q}.$$

Применяя карты Карно, минимизируем уравнение триггера:

$$Q^{n+1} = Q(\bar{C} + \bar{K}) + JC\bar{Q}.$$

Берем двойную инверсию от множителя $(\bar{C} + \bar{K})$ и от правой части уравнения, получаем

$$Q^{n+1} = \overline{Q \cdot (\bar{C}\bar{K}) \cdot (JC\bar{Q})}. \quad (5)$$

Таблица 4

Параметры D -триггеров

Параметр	Синтезированный D -триггер	Классический D -триггер
A , пДж	0,015	0,024
N , шт.	30	38
L , пДж · шт.	0,44	0,92

Таблица 5

Таблица истинности RS -триггера

S	R	Q^{n+1}	S	R	Q^{n+1}
0	0	Q	1	0	Q
0	1	\bar{Q}	1	1	0
1	0	Q	1	0	1
1	1	Q	1	1	0

Таблица 6

Параметры RS -триггеров

Параметры	Синтезированный R -триггер	Классический RS -триггер
A , пДж	0,0054	0,0099
N , шт.	28	32
L , пДж · шт.	0,15	0,32

Таблица 7

Таблица истинности JK -триггера

J	K	Q^{n+1}	J	K	Q^{n+1}
0	0	Q	1	0	Q
0	1	\bar{Q}	1	1	0
1	0	Q	1	0	1
1	1	Q	1	1	\bar{Q}

Таблица 8

Параметры JK -триггеров

Параметры	Синтезированный JK -триггер (рис. 5)	Классический JK -триггер
A , пДж	0,0094	0,017
N , шт.	34	38
L , пДж · шт.	0,32	0,65

По этому уравнению синтезируем первую ступень триггера. Вторую ступень берем из D -триггера и получаем двухступенчатый JK -триггер (рис. 6).

При синтезе заменяем в (5) сигнал \bar{Q} на $\bar{Q}_{\text{ВЫХ}}$.

В классическом триггере микросхемы D1, D2 — трехходовые и имеют обратную связь с $Q_{\text{ВЫХ}}$ и $\bar{Q}_{\text{ВЫХ}}$. Но это избыточная конфигурация. Как показала минимизация, в схеме необязательно использование $Q_{\text{ВЫХ}}$ в цепи обратной связи.

Сравнительные характеристики разработанных JK -триггеров и триггера, выполненного по классической схеме, приведены в табл. 8.

Разработанный JK -триггер содержит меньшее число транзисторов (на 10 %) и имеет более высокую энергоэффективность (в 2 раза).

Заключение

Рассмотрены следующие триггерные схемы: статические и динамические RS -триггеры; D -триггер с динамическим управлением; JK -триггер, реализованные на логических КМОП-элементах по оптимизированному алгоритму.

Синтез схем осуществлен с помощью оптимизированных уравнений триггеров, полученных с помощью таблиц функционирования и карт Карно.

Результаты схемотехнического моделирования показали преимущество разработанных схем перед стандартными схемами триггеров. Выигрыш по работе переключения составляет 1,3...1,8 раза, по числу транзисторов — 10...21 %, по энергоэффективности — 1,6...2,1 раза. В разработанных схемах отсутствует неопределенное состояние.

Синтезированные схемы могут найти применение в энергоэффективной аппаратуре.

Список литературы

1. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника. СПб.: БХВ-Петербург, 2001. 528 с.
2. Рабаи Ж. М., Чандракасан А., Николич Б. Цифровые интегральные схемы. М.: И. Д. Вильямс, 2007. 912 с.
3. Старых А. А. Метод синтеза функциональных блоков комбинационных схем с использованием минтермов и макстермов. // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2015. Вып. 2—3 (236—237). С. 63—69.
4. Кулакова А. А., Лукьяненко Е. Б. Энергоэффективные КМОП-триггеры с инверторной запоминающей ячейкой // Изв. вузов. Электроника. 2019. Т. 24. № 3. С. 230—238.
5. Зельдин Е. А. Триггеры. М.: Энергоатомиздат, 1983. 96 с.

6. **Шило В. Л.** Популярныe цифровыe микросхемы. Справочник. М.: Радио и связь, 1989. 352 с.

7. **Денисенко В. В.** Компактныe модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и наноэлектронике. М.: Физматлит, 2010. 408 с.

8. **Ракитин В. В.** Интегральныe схемы на КМОП-транзисторах. М.: 2007. 307 с.

9. **Кулакова А. А., Лукьяненко Е. Б.** Схемотехника D-триггеров — основныx элементов заказных последовательностных СБИС // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 7. С. 422—429.

A. A. Kulakova, Junior Research Scientist, e-mail: anastasya.staryh@mail.ru,
Southern Federal University Institute of Nanotechnology, Engineering Center of Instrument Making,
Radio- and Microelectronics, Taganrog, 347922, Russian Federation

E. B. Lukyanenko, Ph. D,
Taganrog, 347922, Russian Federation

Corresponding author:

Kulakova Anastasya A., Junior Research Scientist, Southern Federal University Institute of Nanotechnology,
Engineering Center of Instrument Making, Radio- and Microelectronics, Taganrog, 347922, Russian Federation,
e-mail: anastasya.staryh@mail.ru

Optimized Trigger Circuits on Logic CMOS-Elements

Received on January 09, 2020

Accepted on January 16, 2020

Optimized trigger circuits based on CMOS—logic elements are considered in the paper. The technique of minimizing the trigger equations and the synthesis of trigger circuits based on them are given. Based on circuit simulation, a comparison is made of synthesized and standard trigger circuits. The advantage of the synthesized trigger circuits for energy efficiency is shown.

Keywords: RS, D, JK flip—flops, truth diagram, Karnaugh maps, synthesis of circuits, circuit simulation, energy efficiency

For citation:

Kulakova A. A., Lukyanenko E. B. Optimized Trigger Circuits on Logic CMOS-Elements, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 172—176.

DOI:10.17587/nmst.22.172-176

References

1. **Ugrjumov E. P.** Cifrovaja shemotekhnika. Sankt-Peterburg, BHV-Peterburg, 2001. 528 p.

2. **Rabai Zh. M., Chandrakaszn A., Nikolich B.** Cifrovye integral'nye shemy. Moscow, Vil'jams, 2007, 912 p. (in Russian).

3. **Staryh A. A.** Metod sinteza funkcional'nyh blokov kombinacionnyh shem s ispol'zovaniem mintermov i maks-termov, *Jelektronnaja tekhnika. Serija 2. Poluprovodnikovye pribory*, 2015, issues 2—3 (236—237), pp. 63—69 (in Russian).

4. **Kulakova A. A., Luk'janenko E. B.** Jenergojeffektivnye КМОП-триггеры s invertornoj zapominajushhej jachejkoj, *Izv. vuzov. Jelektronika*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 230—238 (in Russian).

5. **Zel'din E. A.** Triggery. Moscow, Jenergoatomizdat, 1983. 96 p. (in Russian).

6. **Shilo V. L.** Populjarnye cifrovye mikroshemy. Spravochnik, Moscow, Radio i svjaz', 1989, 352 p.

7. **Denisenko V. V.** Kompaktnye modeli МОП-транзисторов dlja SPICE v mikro- i nanojelektronike, Moscow, FIZMATLIT, 2010. 408 p. (in Russian).

8. **Rakitin V. V.** Integral'nye shemy na КМОП-транзисторах. Moscow, 2007. 307 p. (in Russian).

9. **Kulakova A. A., Luk'janenko E. B.** Shemotekhnika D-триггеров — osnovnyh jelementov zakaznyh posledovatel'nostnyh SBIS, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 7, pp. 422—429 (in Russian).

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский 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 Е. В. Комиссарова.

Сдано в набор 22.01.2020. Подписано в печать 26.02.2020. Формат 60×88 1/8. Заказ МС220. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Авансед солошнз». Отпечатано в ООО «Авансед солошнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье И.В. Матюшкина, О.М. Орлова,
А.О. Лебедева, Д.С. Мизгинова

«ФЕНОМЕН НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ПРИ ЦИКЛИРОВАНИИ МЕМРИСТОРА»

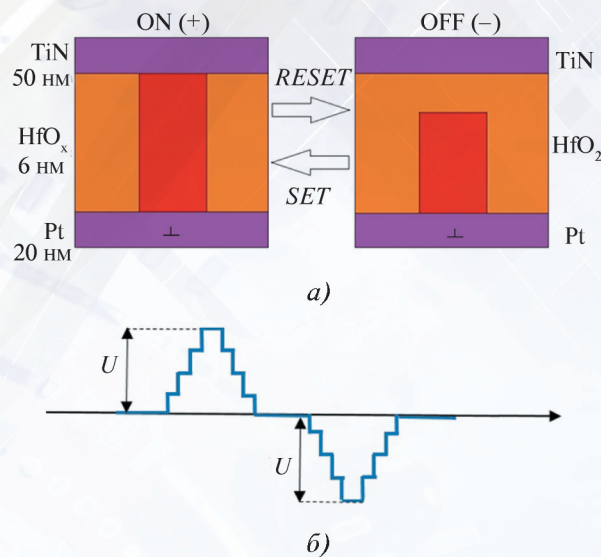


Рис. 1. Мемристивный элемент и схема его циклирования:

a – общая геометрия с указанием области филамента и состояний ON-OFF;
б – схема переключения состояний

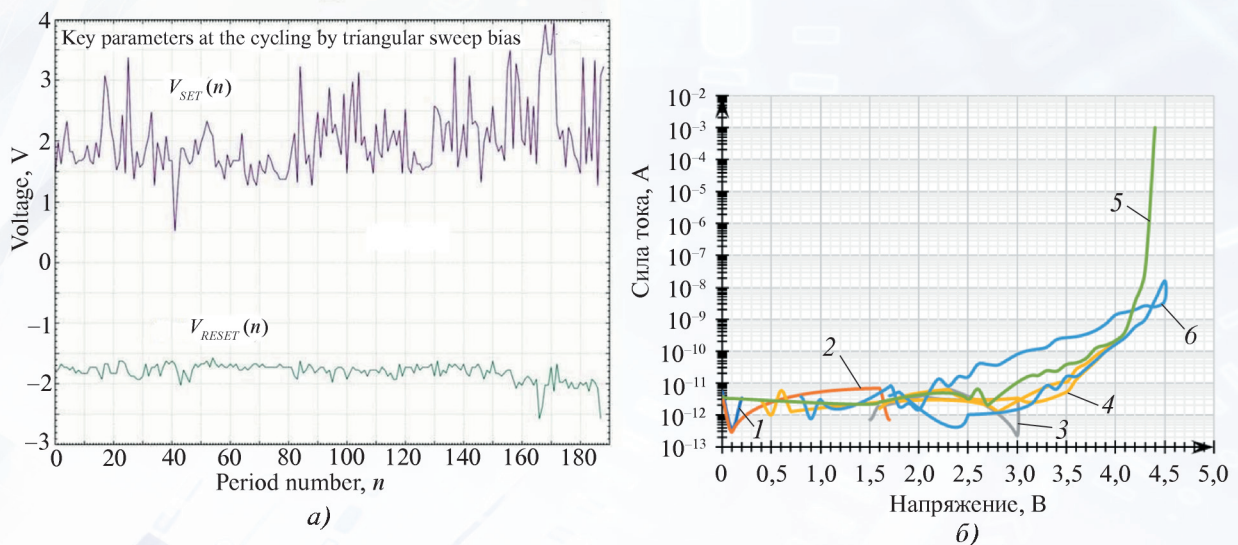


Рис. 2. Типичная эмпирическая зависимость напряжений стирания (V_{RESET} кривая снизу) и записи (V_{SET} кривая сверху) от номера периода n [24]. При дальнейшем циклировании наступает область «fatigue» и кривые уходят в бесконечность (*a*). Циклирование проводилось разверткой треугольной формы с биполярным переключением (при некотором уровне дискретизации сигнала). Зависимость тока от напряжения мемристора (*б*) при разных вариантах формовки (V_g – напряжение на затворе транзистора; V_{te} – напряжение на верхнем электроде):

1 – Формовка 1, $V_g = 1,8$ В, $V_{te} = 1,0$ В; 2 – Формовка 2, $V_g = 1,8$ В, $V_{te} = 2,0$ В;
3 – Формовка 3, $V_g = 1,8$ В, $V_{te} = 3,0$ В; 4 – Формовка 4, $V_g = 1,8$ В, $V_{te} = 4,0$ В;
5 – Формовка 5, $V_g = 1,8$ В, $V_{te} = 4,4$ В; 6 – Формовка, $V_g = 1,6$ В, $V_{te} = 4,5$ В;

Рисунки к статье И.В. Матюшкина, О.М. Орлова,
А.О. Лебедева, Д.С. Мизгинова

«ФЕНОМЕН НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ПРИ ЦИКЛИРОВАНИИ МЕМРИСТОРА»

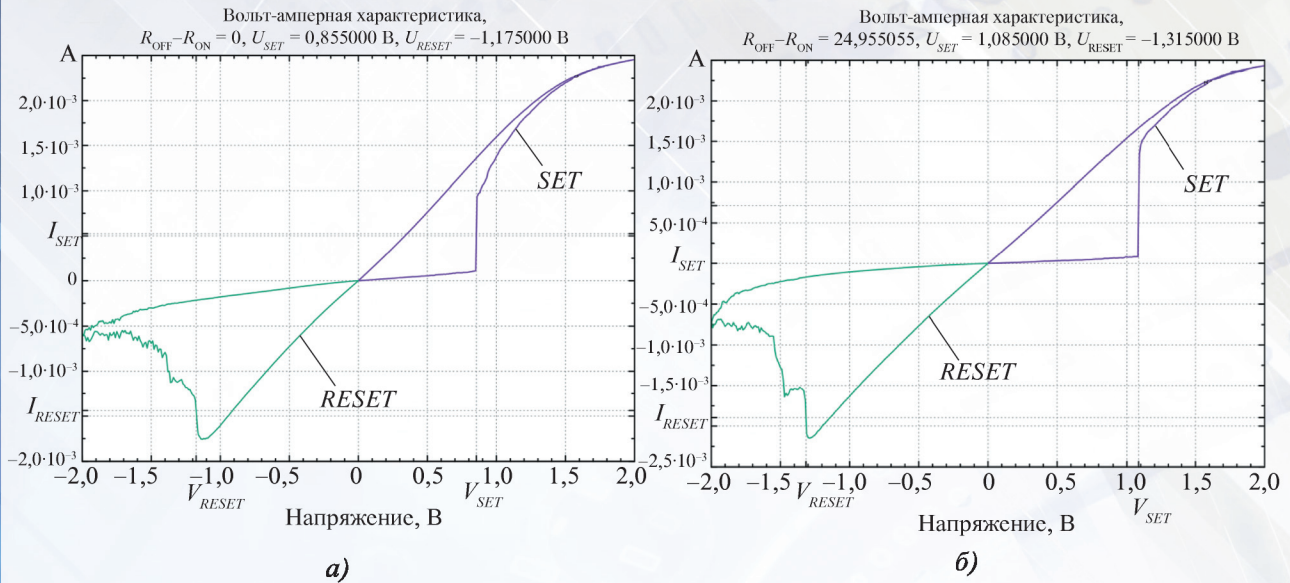


Рис. 4. Гистерезис при циклировании ячейки:
а – первый цикл; б – сотый цикл



Рис. 5. Динамика ключевых параметров мемристивного элемента.
Во вклейке показан временной ряд (R_{ON} , R_{OFF})