

IX Всероссийская научно-техническая конференция Проблемы разработки перспективных микрои наноэлектронных систем

Очередная IX конференция МЭС-2020 будет проведена преимущественно в заочном формате, старт конференции – 1 мая 2020 года. Конференция завершается проведением пленарного заседания в ноябре 2020 г. в Центральном доме ученых по адресу: Москва, ул. Пречистенка, дом 16.



Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» посвящена актуальным вопросам автоматизации проектирования МЭС, систем на кристалле, IP-блоков и новой элементной базы микро- и наноэлектроники. Эти вопросы были и остаются актуальными для науки и техники, о чем свидетельствует тематика соответствующих крупнейших ежегодных международных конференций по САПР и разработке микро- и наноэлектронной аппаратуры.

Конференция МЭС является крупнейшей конференцией в области САПР микроэлектроники на территории России и стран СНГ.

Сессия «Презентации научно-технических достижений российских и зарубежных компаний и организаций, способствующих развитию микроэлектроники в России» и «Круглые Столы» будут проведены в ноябре 2020 г. в КП «Корпорация развития Зеленограда» по адресу: г. Зеленоград, ул. Юности, дом 8.

Сборник трудов конференции МЭС включен в Перечень ВАК (список от 24.03.2020, поз. 1934) российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Специальности, по которым Сборник трудов включен в список ВАК:

- 05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (технические науки)
- 05.13.11 Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)
- 05.13.12 Системы автоматизации проектирования (технические науки)
- 05.13.15 Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети (технические науки)
- 05.27.01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах (технические науки)

Авторам докладов необходимо зарегистрироваться на сайте конференции http://www.mes-conference.ru. Рабочие языки конференции – русский и английский.

Оргкомитет конференции МЭС:

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН: 124365, г. Москва, Зеленоград, ул. Советская, д. З.

ATTACK TO THE

Справки по конференции:

Ходош Лев Соломонович, тел. (с 10 до 18): +7 (925) 011-2468, +7 (499) 135-7551, khod@ippm.ru

Колесник Олег Леонидович, тел.: +7 (499) 729-9569, kolesnik@ippm.ru

Программный комитет: mes2020@ippm.ru

TAIO- & MYKPOCYCEMHAA

Том 22. № 5 � 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

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н., проф.

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

Редакционный совет:

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 Лабунов 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. Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва) Рыжий М. В., д.т.н., проф. (Япония) Сантос Э. Х. П., PhD, Ful. Prof. (Бразилия) Сингх К., к.т.н. (Индия) Телец В. А., д.т.н., проф. Тимошенков 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) /issn1813-8586

Издается с 1999 г.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

СОДЕРЖАНИЕ _____

ларионов Ю. В. изменение значения ширины выступа в результате его сканирования в РЭМ	243
Булярский С. В., Лакалин А. В., Рязанов Р. М. Улучшение эмисси-	215
онных характеристик углеродных нанотрубок после обработки в	
плазме аммиака	251
МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ	
ОСНОВЫ МНСТ	
Крупкин Е. И., Аверин И. А., Алимова Е. А., Карманов А. А., Про-	
нин И. А., Якушова Н. Д. Исследование влияния времени отжига	
наноструктурированных пленок оксида цинка на их структуру и	255
фотокаталитические своиства	255
Ануфрись Ю. В., Эснова Е. В., Боронков Э. П., Фаирушин А. Г. Пс-	
редача информации энтропииной акустической волной в тонкой пленке стеклообразного полупроволника	263
Мустафаев М. Г., Мустафаев Г. А., Мустафаева Л. Г. Материало-	200
ведческо-технологический подход при формировании межсоедине-	
ний в микроэлектронных приборных структурах	271
МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ	
Гандилян С. В. Некоторые вопросы моделирования динамических и	
энергетических характеристик совмещенных электро-магнитоиндук-	
ционных микроэлектромеханических преобразователей энергии и их	
систем	277
ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ	
Дайнеко А. В., Никифоров В. Г., Храмцов А. М., Шахворостов Д. Ю.,	
Щеголева Т. В., Мамин О. Ш. Актюаторы пьезоэлектрические мно-	
гослойные для систем нанопозиционирования	283

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)

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

в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2020

INTERDISCIPLINARY, SCIENTIFIC, TECHNIQUE AND PRODUCTION JOURNAL

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

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. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS Saurov 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) 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.

The Journal is included in the international databases

Vol. 22

No. 5

CONTENTS

NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

 Larionov Yu. V. Variation of Linewidth Value of a Protrusion as a Result of its Scanning in SEM
 243

 Bulyarskiy S. V., Lakalin A. V., Ryazanov R. M. Improving the Emission Characteristics of Carbon Nanotubes after Processing in Ammonia Plasma
 251

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

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

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2020

Чанотехнологии и зондовая микроскопия Папотесноосу аnd scanning probe microscopy

УДК 537.533.35

DOI: 10.1757/nmst.22.243-250

Ю. В. Ларионов, ст. науч. сотрудник, luv@kapella.gpi.ru, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва

ИЗМЕНЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ШИРИНЫ ВЫСТУПА В РЕЗУЛЬТАТЕ ЕГО СКАНИРОВАНИЯ В РЭМ

Поступила в редакцию 17.01.2020

Выступ тест-объекта меры МШПС-2К длительно сканировали в РЭМ с осаждением на нем контаминационной пленки. Сопоставлены значения его ширины, полученные по профилю выступа в атомно-силовом микроскопе (ACM) и по его видеосигналу в растровом электронном микроскопе (РЭМ). Разница в РЭМ- и АСМ-значениях ширины объяснена искажением изображения вследствие зарядов, наведенных пучком РЭМ в слое контаминации на выступе. Размеры выступов меры могут утратить свои исходные значения в ходе РЭМ-контроля при действительном сохранении этих значений.

Ключевые слова: РЭМ, АСМ, мера МШПС-2К, сличение размеров, контаминация, наведенные заряды, искажение РЭМ-изображения

Введение

В работе [1] установлено, что на участке, расположенном за границей участка сканирования, возникает заметное искажение РЭМ-изображения, вызываемое заряжением поверхности выступа сканирующим пучком. При этом сканированный участок выступа отображается в РЭМ без заметных искажений (подобно изображениям выступов за границей участка заряжения поверхности). Это дает возможность измерять размеры сканированных выступов, пользуясь существующим методом измерений линейных размеров для РЭМ [2]. Однако возникает сомнение в отсутствии искажения в изображении сканированной поверхности, поскольку она граничит с участком с сильным искажением.

Обнаружение заряжения поверхности по данным изменения размеров осложняется тем, что они изменяются также вследствие осаждения контаминационной пленки. Пленка способна осаждаться на все участки поверхности выступа, но неравномерно, и поэтому изменяет форму профиля. Необходимо отделить искажения в РЭМ-изображении, вызываемые неравномерным заряжением поверхности, от искажений, вызванных неравномерным осаждением контаминационной пленки.

Цель работы — выявить влияние заряженной поверхности выступа на искажение его РЭМ-изображения и на значения его линейных размеров.

Условия измерений

Ожидаемые искажения могли быть очень слабыми. Для их обнаружения и оценки влияния на геометрические размеры необходимо было сделать их более заметными. Для наведения заметных искажений использовался РЭМ JSM-6460 с диффузионным насосом. Сканирование образца





в нем продолжалось в течение часа при относительно большом токе электронного зонда. Все это должно было привести к ощутимому росту контаминационной пленки на поверхности образца, а также к наведению заряда в его диэлектрических слоях. Наведенные искажения изображения фиксировались на другом РЭМ (S-4800) с полевой эмиссией электронов, а поэтому с высоким пространственным разрешением и при высоком вакууме. Малый ток пучка и ограниченное сканирование выступа позволили избежать дополнительного искажения изображения (к уже наведенному в JSM-6460) вследствие контаминации и наведения заряда.

На РЭМ S-4800 в поле одного кадра создавалось изображение ранее сканированного выступа (рис. 1, выступ *3* в белой рамке), изображения выступов с сильными искажениями (выступы *1*, *2*, *4*, *5* и *6*) вокруг участка сканирования, а также выступа 7 почти без искажения (номера выступов указаны на рис. 1).

Влияние искажения на размеры сканированного выступа оценивали по изменению формы кривой видеосигнала (ВС) (рис. 2). Кривая ВС зависимость амплитуды ВС от координаты развертки пучка вдоль линии сканирования. Она формируется усреднением амплитуд в одинаковых точках линий сканирования во всех строках развертки изображения. В соответствии с работой [2] геометрические размеры выступа и диаметр электронного пучка измеряли по расстояниям между опорными точками на кривой ВС с учетом увеличения РЭМ. Расстановка опорных точек на кривой осуществляется в соответствии с алгоритмом работы [3] с помощью специальной программы на компьютере.

Для отделения искажения, вызываемого заряжением поверхности выступа, от реального изменения его геометрического профиля вследствие осажления контаминационной пленки было использовано дополнительное средство контроля — АСМ. С его помощью регистрировали профиль выступа на участке сканирования и на соседних выступах, не подвергнутых сканированию. В работе [1] было выявлено, что искажение РЭМ-изображения на выступах, соседних со сканируемым, не связано с осаждением на них контаминационной пленки и вызывается заряжением поверхности электронным пучком. Различие в АСМ-профилях сканированного и соседних с ним выступов мы сопоставили с изменением формы кривых ВС на сканированном участке и на выступе без заметных искажений.

Эксперименты

На рис. 2 показаны АСМ-профили выступов сканированного (3), соседнего (4) вместе с кри-

выми ВС также от сканированного выступа (2) и выступа с неискаженным изображением (1). Все кривые расположены вдоль оси Хтак, чтобы вертикальные линии, проходящие через середины ВО на каждой кривой, совпали. Масштаб расстояния вдоль оси Х для каждой кривой калибровали по периоду расположения выступов, номинально равному 2 мкм. Однако период в расположении выступов вблизи участка сканирования на РЭМ-изображении искажен вследствие заряжения поверхности вблизи участка сканирования (см. рис. 1). Поэтому калибровку расстояния вдоль оси Х для кривых ВС проводили по периоду между неискаженными участками выступов 6 и 7. Калибровку расстояния вдоль оси Хдля АСМпрофилей проводили по расстоянию между серединами выступов 3 и 4, которое принимали равным точно 2,000 мкм. Калибровка расстояния с использованием изображений раз-

личных периодов в разных методах измерений могла привести к неопределенности размеров одинаковых участков на разных кривых, которая, по нашей оценке, может быть 1...3 нм.

Масштаб вдоль оси *Y* для РЭМ-кривых и ACM-профилей разный. Для ACM-профилей указана высота в нанометрах. Для кривых BC масштаб указан в условных единицах и выбран таким, чтобы участки, соответствующие боковым стенкам выступов, были параллельны участкам, соответствующим боковым стенкам на ACMпрофилях.

Определение размеров участков реального профиля с нанометровыми размерами является сложной методической задачей. Сложность состоит в том, что для реального профиля с закруглениями на углах невозможно указать положение точек, соответствующих точкам модельного профиля, в виде правильной трапеции. Радиус закруглений на углах трапеции, сформированной анизотропным травлением кремния, составляет несколько нанометров [4]. Контаминационная



Рис. 2. Кривые BC от сканированного выступа (кривая 3), от выступа без искажения (кривая 4) и наложенные на них кривые ACM-профилей от участка сканирования (2) и от выступа без контаминации (1).

Величины W_U , W_B — ширины выступа по верхнему и нижнему основаниям для кривой 3; W_{UP} , W_{BP} — соответственно для кривой 4. Величины S и S_P — ширина проекции боковой стенки выступа для кривых 3 и 4. Отрезки прямых, аппроксимирующие квазилинейные участки кривой BC 4, обозначены пунктиром. Опорные точки (точки пересечения этих отрезков прямых) обозначены знаком * и латинскими буквами A, ..., H. Символы + и — указывают на расположение зарядов по поверхности выступа

пленка толщиной в несколько десятков нанометров способна увеличить радиус на порядок. Исходная неопределенность линейных размеров, связанная с закруглениями на углах выступа, увеличивается вследствие методических погрешностей в каждом из методов измерений по-разному. Источник дополнительной неопределенности — размер зонда, сканирующий профиль выступа. Для ACM — это радиус иглы кантилевера, для РЭМ — это радиус электронного пучка. Отличие реальных параметров зондов от модельных приводит к увеличению неопределенности в разнице размеров участков профиля, полученных на разных устройствах.

Неопределенность измерений можно уменьшить, если значение ширины не привязывать к угловым точкам нанометрового выступа, а определять ее на уровне полувысоты этого выступа. Дополнительное уменьшение неопределенности может быть достигнуто, если сопоставлять не значения ширины, полученные в каждом из методов, а изменение ширины, возникающее в результате сканирования выступа в РЭМ, т. е. его уширение. В этом случае аддитивные части в методических погрешностях, существующие в каждом из методов измерений, исключаются из разницы размеров. Поэтому, если РЭМ-уширение окажется больше АСМ-уширения, то это будет означать, что заряжение сканированной в РЭМ поверхности существует и вызывает увеличение размеров выступа.

Результаты и их анализ

1. Оценка уширения выступа по АСМ-профилю выступа. Уширение по уровню полувысоты можно относительно просто определить по АСМкривым, отображающим профиль выступа. Для уменьшения неопределенностей, связанных с изменением состояния АСМ и его иглы при двукратном сканировании образца (до сканирования выступа в РЭМ и после), уширение определяли лишь по одному АСМ-изображению, полученному после сканирования выступа в РЭМ. В таком подходе уширение определяли по разнице ширины сканированного и несканированного выступов, попавших в поле АСМ-изображения участка тест-объекта. Однако в этом случае также



Рис. 3. АСМ-профили выступов. Номера кривых соответствуют номерам выступов:

3 — полужирная кривая, 1 — тонкая кривая, 4 — штрих-пунктирная кривая. Кривые совмещены по осевым линиям выступов. Ширину измеряли по средней линии выступов на высоте 300 нм

возникает неопределенность в оценке уширения в виде разброса в исходной ширине разных выступов. Для оценки этой неопределенности мы фиксировали ACM-профили сканированного *3* и двух несканированных — *1* и *4* выступов. Разница в ширине последних выступов дает оценку неопределенности, которая может возникнуть при измерении уширения, возникающего в результате сканирования. На рис. 3 представлены кривые, соответствующие этим трем профилям. Профили выступов получены при сканировании их вдоль одной линии, проходящей через середину участка РЭМ-сканирования.

Видно, что профили выступов 1 и 4 практически совпадают в верхней их части и слегка расходятся в нижней. Это означает, что радиус острия кантилевера не изменился после сканирования контаминированного выступа 3. Кривая 3 симметрично охватывает кривые 1 и 4 сверху. Большинство точек для нижних участков кривых 1 и 4 расположены под кривой 1. Отличия в форме кривой 3 относительно кривых 1 и 4 возникают вследствие осаждения контаминационной пленки. Отметим, что правые части всех кривых немного шире левых. Этот вид искажения можно объяснить тем, что игла кантилеве-

> ра располагалась неортогонально поверхности пластины.

Измерение ширины выступов на уровне их полувысоты в 300 нм проводили по кривым с помощью программы Origin-6, позволяющей воспроизводить координаты точек на кривой ВС с неопределенностью порядка 0,1 нм. Калибровку измерений ширины проводили с использованием значения периода в расположении выступов 3 и 4 также на уровне полувысоты 300 нм. Значение периода принимали равным 2000 нм. На этой высоте уширение ∆ сканированного выступа относительно выступа 1 (Δ_{31}) составило ~21 нм, относительно выступа 4 (Δ_{34}) ~45 нм. Среднее значение уширения Δ для Δ_{31} и Δ_{34} составило 33 нм.

2. Оценка уширения выступа по кривым BC от выступа. Форма кривой BC на сканированном участке выступа отличается от

соответствующей формы на выступе без искажений на рис. 2 (кривые 4 и 3) заметнее, чем кривые ACM-профилей для сканированного и несканированного участков (кривые 1 и 2). Прежде всего заметно значительное смещение пиков кривой 4 от осевой линии, что привело к увеличению расстояния между ними на ~160 нм. Смещенные пики оставляют на участках первоначального их расположения искажения формы в виде уступов или полочек (на рис. 2 под символами +). Такие изменения формы сложно аппроксимировать отрезками прямых, которые нужны для измерения ширины верхнего основания (BO) в соответствии с алгоритмом ее расчетов в работе [1].

Увеличение высоты пиков на кривой 4 по отношению к пикам кривой 3 приводит к соответствующему смещению положения опорных точек вдоль оси Y. Это означает, что расстояние между опорными точками, расположенными вдоль горизонтальной линии для кривой 3, нельзя использовать для оценки ширины ВО по кривой 4 (в отличие от расстояния между кривыми 1 и 2, отображающими АСМ-профили выступа).

И наконец, можно заметить, что изменился наклон кривых на участках AB, CD, EF и GH. Его значение влияет на значение диаметра электронного пучка, определяемого по кривым BC [2]. Изменения в наклонах означают, что параметры электронного пучка, выходящего из поверхности при сканировании исходного выступа и выступа с контаминацией, различны (в отличие от зонда ACM). Отмеченные выше отличия в форме кривых 3 и 4 сложно объяснить только контаминационным уширением, ибо тогда они были бы похожи на отличия ACM-профилей на кривых 1 и 2.

Значения ширины по кривым 3 и 4 измеряли в соответствии с методом в работе [2]. Для кривой 3 латинскими буквами обозначены границы участков кривых, по ширине проекций которых определяют размеры выступа (с учетом увеличения РЭМ). Такое же обозначение границ участков мы будем использовать и для кривой 4. Середины участков AB, CD, EF, GH соответствуют положению верхних и нижних угловых точек модельной равнобедренной трапеции, которая используется для расчетов размеров измеряемого выступа по его РЭМ-изображению. Это соответствие достигается в случае, когда максимумы плотности падающего пучка электронов совпадают с угловыми точками трапеции. По этой причине величины W_U и W_{UP} (расстояния между серединами отрезков *CD* и *EF* на рис. 2) соответствуют ширине верхнего основания для исходного и сканированного выступов соответственно. Величины W_B и W_{BP} — расстояния между серединами отрезков *AB* и *GH* на рис. 2 соответствуют подобным образом ширине нижнего основания для исходного и сканированного выступов.

В нашей задаче ширина выступа $W_{0,5}$ измеряется по его полувысоте. Ее можно определить как среднее значение ширины по верхнему и нижнему основаниям или

$$W_{0.5} = (W_U + W_B)/2. \tag{1}$$

Однако для контаминированного выступа возникает неопределенность в значении ширины W_{UP} , измеренной по верхнему основанию. Она появляется вследствие ступенчатой формы участка кривой между ее пиками (см. рис. 2, положение ступенек обозначено знаками +). Искаженная форма кривой не позволяет однозначно указать на ней точки, соответствующие границам верхнего основания. (Для кривой 3 с монотонным спадом сигнала от пиков к середине кривой такие точки располагаются на середине этих спадов, определяя величину W_{II} .) В нашей модели примем, что границы верхнего основания контаминированного выступа соответствуют точкам кривой 4, которые расположены точно на середине ступенек, обозначенных символами + (см. рис. 2).

Можно предложить способ определения ширины выступа по полувысоте $W_{0,5}$ без измерения ширины верхнего основания, в котором измеряется ширина проекции склонов и ширина нижнего основания (с исключением неопределенности в положении границы верхнего основания). Ширина $W_{0.5}$ этим способом определится как

$$W_{0.5} = W_B - (S_L + S_R)/2,$$
 (2)

где $(S_L + S_R)/2$ — усредненное значение ширины проекций склонов на уровне полувысоты. Однако в этом способе измерения верхние границы склонов совпадают с границами верхнего основания выступа и поэтому также не могут быть точно указаны для контаминированного выступа.

Предложенный способ измерения $W_{0.5}$ следует модифицировать, исключив из него необходимость выбора точек на кривой, соответствующих границам верхнего основания. Для этого надо изменить алгоритм измерения диаметра пучка. В согласии с моделью [2] точка А на кривой ВС (см. рис. 2) соответствует моменту касания правой границей сканирующего пучка нижней угловой точки трапеции (при сканировании слева направо). Точка С соответствует моменту касания той же правой границей пучка, но верхней угловой точки трапеции. Поэтому расстояние между точками А и С также должно равняться ширине проекции склона. В этом способе измерения нет необходимости определять положение границ верхнего основания, и поэтому неопределенность, связанная с их неточным положением, отсутствует.

В нашей работе величина $W_{0,5}$ была измерена в соответствии с формулами (1) и (2). В таблице представлены значения $W_{0,5}$ для выступа 3 и 7, полученные по формуле (1) и для сравнения по формуле (2).

Уширение, вычисленное по формуле (2), на 50 нм больше значения, определенного по формуле (1). Значением, соответствующим модели в наибольшей степени, является 191 нм. Отметим, что смещение пиков кривой 4 по отношению к пикам кривой 3 привело к увеличению расстояния между ними на 160 нм. Максимальное отличие в РЭМ-значениях уширения Δ , измеренных разными способами (т. е. неопределенность), в 50 нм, намного меньше даже минимальной разницы в значении уширения, равного 141 нм. Это убеждает, что значение РЭМ-уширения объясняется в основном зарядовым эффектом, а не материальным (контаминационным) изменением профиля.

Интересны детали того, как изменились размеры на разных участках профиля. Увеличение размера верхнего основания на ~210 нм (измеренное по опорным точкам верхнего основания) сопровождалось увеличением ширины нижнего основания на ~70 нм и уменьшением суммарной проекции ширины склонов на ~180 нм. Два пос-

Вычисление по формуле	<i>W</i> _{0,5} , нм (выступ 3)	<i>W</i> _{0,5} , нм (выступ 7)	Δ, нм
(1)	1091	950	141
(2)	1114	923	191

ледних значения определены по модифицированному способу измерений и в сумме приводят к уширению верхнего основания на 250 нм. Разница в 40 нм между уширением ВО основным и модифицированным способом свидетельствует о методической погрешности измерения размеров искаженного профиля ВО по кривой ВС 4 с помощью РЭМ. В противоположность этому измерения АСМ-профиля привели к уширению верхнего основания всего на ~40 нм, при этом нижнее увеличилось лишь на 8...10 нм. Это означает, что ширина проекции каждого из склонов реально уменьшилась только на ~15 нм. Мнимое уменьшение РЭМ-значений ширины проекций склонов на 90 нм (вместо 15 нм) можно объяснить неравномерностью расположения зарядов вдоль боковых стенок.

Неожиданной является асимметрия профилей выступов. Измерения по АСМ-профилям трех выступов выявили, что их правые проекции склонов (~530 нм) шире левых (~300 нм) на ~70 %. По кривым ВС ширина двух правых склонов оказалась также больше левых, но на ~15 %. Причиной асимметрии профиля кривых ВС и в последнем случае может быть неточное выставление падающего пучка относительно нормали к поверхности, причем в РЭМ оно меньше, чем в АСМ. Теоретически правые и левые склоны должны быть одинаковы, поскольку они создаются с помощью анизотропного травления, обнажающего кристаллографические плоскости [111] кристаллического кремния в плоскости обеих боковых стенок. Мы предполагаем, что РЭМизмерения асимметрии склонов более точны. Любопытно, что асимметрия склонов выступов с контаминацией и без нее по кривым ВС почти одинакова — 15 и 13 %. Это означает, что наведенные заряды на склонах, существенно изменившие их измеряемый размер, распределены почти одинаково на правой и левой частях выступа.

Отметим, что реальные склоны выступов, сформированных анизотропным травлением кремния по кристаллографическим плоскостям [111], могут отличаться от полностью симметричных и атомарно гладких в теории. Основанием для такого предположения являются данные работы [5], где измерялась шероховатость (невоспроизводимость ширины) выступов в мере SCCDRM. Боковые стенки этой меры также формировались анизотропным травлением кремния и теоретически должны быть атомарно-гладкими и совершенно ровными. Но оказалось, что существуют отклонения боковых стенок от кристаллографических плоскостей [111] на отдельных участках.

Анализ и обсуждение результатов

Длительное сканирование выступов в РЭМ приводит к заметному увеличению значений ширины выступов. Уширение, выявленное по кривым ВС (на основе РЭМ-изображений), в ~6 раз больше, чем по данным контроля АСМ-профилей тех же выступов. Причиной этого является искажение РЭМ-изображения сканируемого выступа, которое вызывается зарядами, локально наводимыми на его поверхности электронным пучком. Наведенные заряды локально изменяют эмиссию медленных вторичных электронов (МВЭ), которые формируют искаженное РЭМизображение выступа. В таком изображении вид кривой ВС уже не определяется геометрическим профилем выступа. Действительно, если при единичном сканировании выступа положение пиков кривой 3 на рис. 2 примерно соответствует закругленным углам ВО на профиле выступа, то при длительном сканировании оно соответствует верхней части боковой стенки (кривая 4). На рис. 2 знаками + и - показано предполагаемое распределение зарядов вблизи поверхности выступа. Положительные заряды, уменьшающие эмиссию МВЭ, расположены вблизи углов на краях ВО трапеции, в результате чего пики на кривой 3 исчезают. Отрицательные заряды распределены вдоль боковых стенок, что приводит к увеличению эмиссии МВЭ из них (кривая 4 относительно 3). Расположение участков кривых 3и 4, соответствующих склонам выступа (ВС и FG), оказалось почти параллельным. Такое расположение кривых ВС означает, что отрицательные заряды в средней части боковых стенок сканированной трапеции распределены равномерно. Лишь у углов выступа плотность их размещения отлична от равномерной. Наибольшая их плотность локализована в верхней части боковых стенок вблизи участка с закруглениями. Поэтому в этих местах возникают пики кривой 4. Наименьшая плотность существует около нижних углов трапеции, что приводит к сближению кривых 3 и 4 на участках AB и GH.

Предположение о характере распределения зарядов вдоль поверхности выступа, подвергнутого сканированию, подтверждается данными

моделирования в работе [6]. В этой работе моделировали наведение зарядов на поверхности выступа, сформированного в слое электронного резиста на поверхности кремниевой пластины. Моделирование распределения зарядов проводили методом Монте-Карло. Параметры выступа в работе [6] примерно соответствуют параметрам наших выступов: период в их расположении — 0,5 мкм, ширина ВО — около 250 нм, высота выступа — 750 нм, профиль выступа в виде трапеции, но близок к прямоугольному. Хотя параметры используемого РЭМ в работе [6] отличались от используемого нами (U = 1,5 кэB), картина распределения зарядов на поверхности выступов оказалась качественно похожей. Так, вблизи верхних углов на ВО и в верхней части боковых стенок обнаружились положительные заряды, при этом на нижней части боковых стенок — отрицательные заряды с убывающей плотностью их распределения к основанию выступа [6], т. е., предположительно, как и на наших выступах.

Заключение

Увеличение РЭМ-значения ширины выступа при длительном его сканировании электронным пучком вызвано, в основном, наведенными зарядами на поверхности этого выступа. Поверхность выступа в результате такого сканирования в РЭМ с диффузионным насосом покрывается относительно толстой (до 20 нм) контаминационной пленкой. В ней, вероятно, и наводятся электрические заряды.

Заряды на поверхности выступа имеют разные знаки: положительные — около его верхних углов, отрицательные — вдоль его боковых стенок. Такое наведение зарядов некомформно искажает профиль видеосигнала от выступа, однако не приводит к такому сильному искажению, как за границей зоны сканирования. Заряды в пленке и на выступе, и за границей зоны сканирования сохраняются длительное время (~ год) в неизменном виде при хранении образца в атмосферных условиях.

Автор выражает признательность Митюхляеву В. Б. за получение РЭМ-изображений выступов и Филиппову М. Н. — за измерение рентгеновских спектров от контаминированных участков.

Список литературы

1. **Ларионов Ю. В.** Изменение размеров выступа меры МШПС-2К при ее контроле в РЭМ // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 4. С. 179—185.

2. Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Плотников Ю. И., Раков А. В., Тодуа П. А. Линейная мера микрометрового и нанометрового диапазонов для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии // Труды ИОФАН. 2006. Т. 62. С. 36—76.

3. **Программа** анализа изображений микроскопов, программная платформа NDPL, https://yadi.sk/i/ YtOL8GEid9nK4, 2009. 4. **Ларионов Ю. В.** Оценка диаметра пучка РЭМ по кривым видеосигнала от трапецеидальной структуры. 1. Модельный эксперимент // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. № 3. С. 87—97.

5. Davidson M. W., Mijare G. I., Allen R. A., Geist J., Bishop M. // Proc. of Int. Conf. on Microelectronic Test Structures, 2009. P. 84.

6. **Yeong-Uk Ko, Seung-Woo Kim, Myung-Sae Chung.** Monte Carlo Simulation of Charging Effects on Linewidth Metrology // Scanning. 1998. Vol. 20. P. 447–455.

Yu. V. Larionov, Senior Researcher, luv@kapella.gpi.ru,

A. M. Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, 119991, Russian Federation

Corresponding author: Larionov Yuriy V., Senior Researcher, A. M. Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, 119991, Russian Federation E-mail: luv@kapella.gpi.ru

Variation of Linewidth Value of a Protrusion as a Result of its Scanning in SEM

Received on January 17, 2020 Accepted on February 13, 2020

A protrusion profile with linear sizes in nanometer range fixed by AFM is matched with video signal (VS) profile obtained by SEM. The protrusion is a topologic structure of the test- object of a MShPS-2K measure with the trapezoid profile. Its scanning in a SEM during an hour leads to increase of its upper base (UB) linewidth to 40 nm (according to AFM-data) due to the contamination deposited on the protrusion surface. However UB broadening measured by using VS is 180 nm. Difference in linewidth values fixed by SEM and AFM is explained by VS distortion emerged due to charges locally induced by electron beam in the contamination layer. Induced positive and negative charges are distributed uneven along the protrusion profile. The charges increase the measured value of the UB linewidth and diminished linewidth values of protrusion slopes. As a result a MShPS-2K measure is able to lose its metrological properties.

Keywords: SEM, AFM, MShPS-2k measure, size comparison, contamination, induced charges

For citation:

Larionov Yu. V. Variation of Linewidth Value of a Protrusion as a Result of its Scanning in SEM, *Nano- i* mikrosistemnaya tekhnika, 2020, vol. 22, no. 5, pp. 243–250.

DOI: 10.17587/nmst.22.243-250

References

1. **Larionov Yu. V.** Izmenenie razmerov vystupa mery MSHPS-2K pri ee kontrole v REM, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 179–185 (in Russian).

2. Novikov Yu. A., Ozerin Yu. V., Plotnikov Yu. I., Rakov A. V., Todua.P. A. Lineinaya mera mikro i nanometrovogo diapazona dlya rastrovoi elektronnoi i atomno-silovoi mikroskopii, *Trudi IOFAN*, 2006, vol. 62, pp. 36–76 (in Russian).

3. **Progpama** analiza izobradzenii mikroskopov, programaya platforma NDPL, URL: https://yadi.sk/i/ YtOL8GEid9nK4, 2009 (in Russian). 4. Larionov Yu. V. Otsenka diametra putchka REM po krivim videosignala ot trapetseidalnoi strukturi 1. Vodelnii eksperiment, *Poverkhnost. Rentgenovskie, sinkhrotronnie i neitronnie issledovaniya*, 2016, no. 3, pp. 87–97 (in Russian).

5. Davidson M. W., Mijare G. I., Allen R. A., Geist J., Bishop M. Proc. of Int. Conf. on Microelectronic Test Structures, 2009, 84 p.

6. **Yeong-Uk KO, Seung-Woo Kim, Myung-Sae Chung.** Monte Carlo Simulation of Charging Effects on Linewidth Metrology, *Scanning*, 1998, vol. 20, pp. 447–455. С. В. Булярский, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр., bulyar2954@mail.ru, А. В. Лакалин, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., a.v.lakalin@mail.ru, Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, Москва, Р. М. Рязанов, науч. сотр., r.m.ryazanov@gmail.com, Научно-производственный комплекс "Технологический центр", Москва

УЛУЧШЕНИЕ ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ В ПЛАЗМЕ АММИАКА

Поступила в редакцию 18.03.2020

Углеродные нанотрубки, синтезированные по технологии, исключающей легирование азотом, подвергались обработке в плазме аммиака. В результате концентрация азота в нанотрубках увеличивалась до 3,6 %, со-противление нанотрубок падало в 6 раз, работа выхода уменьшалась на 10 %. После такой обработки также наблюдалась стабилизация процесса эмиссии.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, легирование азотом, плазма аммиака, холодная эмиссия

Одним из важных направлений современной микроэлектроники является создание транзисторов с каналом из углеродных нанотрубок [1]. Для получения необходимых электрических свойств таких каналов углеродные нанотрубки (УНТ) необходимо легировать. Легирование УНТ в настоящее время осуществляется, как правило, в процессе синтеза [2, 3]. Аналогичная ситуация возникает и с холодными эмиттерами на основе УНТ [4, 5], которые легируют в процессе синтеза для снижения сопротивления холодного катода [2]. Однако и после синтеза УНТ возникает необходимость их легирования в целях повышения эффективности эмиссии. Для этого наносят слои оксидов меди [6] или цинка [7]. Эффективным технологическим приемом является обработка готовых холодных эмиттеров в плазме водорода, которая уменьшает работу выхода УНТ с 4,8 до 3,3 эВ [8]. В настоящей работе исследуется влияние обработки на эмиссионные структуры на основе УНТ в плазме аммиака. Показано, что происходит уменьшение последовательного сопротивления УНТ, что приводит к снижению разогрева и стабилизации эмиссии во времени.

В качестве исходных подложек использовали монокристаллический кремний марки КЭМ ориентации (100) с сопротивлением 0,003...0,005 Ом/см. На подложки напыляли каталитический слой — диффузионно-барьерный

Ті толщиной 25 нм и собственно катализатор синтеза УНТ — Ni толщиной 5 нм. Синтез массивов углеродных нанотрубок проводился методом плазмостимулированного химического парофазного осаждения. В едином цикле проводили окислительный, восстановительный отжиг, требуемые для формирования наночастиц катализатора из тонких пленок, и непосредственно синтез. Окислительный отжиг длительностью 10 мин проходил в потоке аргона (300 см³/мин) и кислорода (100 см³/мин) при температуре 280 °С при включении ВЧ плазмы мощностью 100 Вт. Восстановительный отжиг осуществлялся в потоке аргона (300 $cm^3/мин$) и аммиака (100 $cm^3/мин$) также в течение 10 мин при температуре 680 °C и той же мощности плазмы. Синтез проводился при температуре 680 °C в течение 5 мин при давлении в 2 Торр в потоке газов: $H_2 - 100 \text{ см}^3/\text{мин}$; Ar $- 100 \text{ см}^3/\text{мин}$; $C_2H_2 - 100 \text{ см}^3/\text{мин}$. В процессе синтеза мощности плазмы составляли 20 Вт для ВЧ составляющей и 30 Вт для НЧ. Таким образом, азотсодержащие газы в процессе синтеза не использовались.

У полученных образцов измеряли эмиссионные вольт-амперные характеристики. После этого часть образцов подверглась обработке в плазме аммиака в течение 10 мин при температуре T = 680 °C в высокочастотном плазменном разряде аммиака мощностью 100 Вт. При этом рас-



Рис. 1. РЭМ-снимки поверхности подложки с УНТ до и после обработки в плазме аммиака: слева — до обработки, справа — после обработки

ход NH₃ составлял 100 см³/мин при давлении 1,5 Торр. После обработки образцов в плазме измерения повторяли.

На рис. 1 приведены фотографии массива УНТ до и после обработки в плазме аммиака. Из рисунка видно, что обработка массива плазмой аммиака привела к изменению геометрии УНТ: трубки "вытянулись" и в целом массив стал ближе к вертикальному.



Рис. 2. Эмиссионные вольт-амперные характеристики массива УНТ:

1 — образцы сразу после синтеза; 2 — образцы после обработки в плазме аммиака; 3, 4 — аппроксимации начальных участков законом Фаулера—Нордгейма

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов до и после обработки в плазме показаны на рис. 2. До обработки в плазме последовательное сопротивление составляло 140 ± 10 кОм, после обработки в плазме сопротивление стало 23 ± 8 кОм. Обработка в плазме привела и к незначительному уменьшению наклона вольт-амперной характеристики, построенной в координатах Фаулера-Нордгейма, что соответствует некоторому снижению работы выхода на величину около 10 %. Ток автоэлектронной эмиссии, рассчитанный по закону Фаулера-Нордгейма, для каждой кривой на рис. 2 изображен сплошной линией. На рисунке видно, что на начальном участке экспериментальные ВАХ хорошо описываются законом Фаулера—Нордгейма, а по мере увеличения напряжения наблюдается отклонение от закона. Это связано с наличием у УНТ омического сопротивления, на котором происходит падение напряжения.

Снижение сопротивления в 6 раз привело к уменьшению разогрева образца и стабилизации эмиссии. Действительно, в образцах до плазменной обработки ток эмиссии уменьшался приблизительно на 20 % за первые 2 ч работы. После плазменной обработки снижения тока не происходило, даже после 20 ч работы эмиттера при том же значении тока, что и у образцов сразу после синтеза. Для того чтобы оценить уменьшение температуры нанотрубок, которые участвовали в эмиссии, были выполнены расчеты разогрева УНТ по методике, которая изложена в работе [9]. В зависимости от протекающего тока температура эмитирующего конца УНТ образцов без



Рис. 3. Расчет зависимости температуры эмитирующего конца нанотрубки длиной 2,4 мкм от значения протекающего тока для образцов:

I — сразу после синтеза; 2 — после обработки в плазме аммиака

обработки и с обработкой в плазме аммиака существенно различается. На рис. 3 приведен расчет температуры эмитирующего конца от значения протекающего тока для нанотрубки длиной 2,4 мкм. Понижение температуры связано с уменьшением Джоулевой теплоты, которая выделяется на нанотрубках.

Таким образом, при обработке УНТ в плазме аммиака происходит их легирование. На это указывает уменьшение сопротивления, которое связано с тем, что азот в УНТ действует как донорная примесь [2]. Снижение сопротивления массива УНТ приводит к сокращению тепловыделения, уменьшению температуры эмитирующего конца УНТ и в целом к стабилизации процесса эмиссии. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, проект № 0004-2019-0003, с использованием УНУ КУТГИ ИНМЭ РАН.

Список литературы

1. **Bargaoui Y., Troudi M., Bondavalli P., Sghaier N.** Gate bias stress effect in single-walled carbon nanotubes field-effect-transistors // Diamond and Related Materials. 2018. Vol. 84. P. 62–65. DOI: 10.1016/j.diamond.2018.03.011

2. **Bulyarskiy S. V., Saurov A. N.** Doping of Carbon Nanotubes. / Editors Sergey Bulyarskiy, Alexandr Saurov. — Cham: Springer International Publishing, 2017: NanoScience and Technology. 187 p.

3. **Zhao Z., Gao C., Ma K, Lu Y.** Pyrolysis derived helically nitrogen-doped carbon nanotubes with uniform cobalt for high performance oxygen reduction // Applied Surface Science. 2020. Vol. 504. N. 144380. P. 1–6. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.144380

4. Zhang Y., Tan Y., Wang L., Li B., Ke Y., Liao M., Xu N., Chen J., Deng S. Electron emission and structure stability of carbon nanotube cold cathode driven by millisecond pulsed voltage // Vacuum 2020. Vol. 172. N. 109071. P. 1–6. DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.109071

5. **Parveen S., Kumar A., Husain S., Husain M.** Fowler Nordheim theory of carbon nanotube based field emitters // Physica B. 2017. Vol. 505. P. 1–8. DOI: 10.1016/ j.physb.2016.10.031

6. Maity A., Das S., Sen D., Chattopadhyay K. K. Tailored CuO nanostructures decorated amorphous carbon nanotubes hybrid for efficient field emitter with theoretical validation // Carbon. 2018. Vol. 127. P. 510–518. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.11.018

7. Nawn D., Banerjee D., Chattopadhyay K. K. Zinc oxide nanostructure decorated amorphous carbon nanotubes: An improved field emitter // Diamond and Related Materials. 2013. Vol. 34. P. 50–59. DOI: 10.1016/j.diamond.2013.02.001

8. Булярский С. В., Богданова Д. А., Кицюк Е. П., Лакалин А. В., Павлов А. А., Рязанов Р. М., Шаманаев А. А., Шаман Ю. П. Уменьшение работы выхода при гидрогенизации углеродных нанотрубок в плазме водорода // ПЖТФ. 2018. Т. 44. № 10. С. 55—60. DOI: 10.21883/PJTF.2018.10.46099.17236

9. Булярский С. В., Дудин А. А., Лакалин А. В., Орлов А. П., Павлов А. А., Рязанов Р. М., Шаманаев А. А. Стабильность полевой эмиссии одиночной углеродной нанотрубки // ЖТФ. 2018. Т. 88, № 6. С. 920—925. DOI: 10.21883/JTF.2018.06.46026.2447

S. V. Bulyarskiy, D. Sc., Professor, Chief Researcher, bulyar2954@mail.ru,

A. V. Lakalin, Ph. D., Senior Researcher, a.v.lakalin@mail.ru,

Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow,

R. M. Ryazanov, Researcher, r.m.ryazanov@gmail.com,

Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre", Moscow

Corresponding author:

Bulyarskiy Sergey V., Dr. Sci., Professor, Chief Researcher, bulyar2954@mail.ru, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, bulyar2954@mail.ru

Improving the Emission Characteristics of Carbon Nanotubes after Processing in Ammonia Plasma

Received on March 01, 2020 Accepted on March 24, 2020

Carbon nanotubes synthesized using technology that excludes nitrogen doping were processed in ammonia plasma. As a result, the nitrogen concentration in the nanotubes increased to 3.6 %, the resistance of the nanotubes fell by a factor of 6, and the work function decreased by 10 %. After this treatment, stabilization of the emission process was also observed.

Keywords: carbon nanotubes, doping with nitrogen, ammonia plasma, cold emission

For citation:

Bulyarskiy S. V., Lakalin A. V., Ryazanov R. M. Improving the Emission Characteristics of Carbon Nanotubes after Processing in Ammonia Plasma, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 5, pp. 251–254.

DOI: 10.17587/nmst.22.251-254

References

1. **Bargaoui Y., Troudi M., Bondavalli P., Sghaier N.** Gate bias stress effect in single-walled carbon nanotubes field-effect-transistors, *Diamond and Related Materials*, 2018, vol. 84, pp. 62–65. DOI: 10.1016/j.diamond.2018.03.011

2. Bulyarskiy S. V., Saurov A. N. Doping of Carbon Nanotubes. / NanoScience and Technology. Editors Sergey Bulyarskiy, Alexandr Saurov. Cham: Springer International Publishing, 2017. 187 p.

3. **Zhao Z., Gao C., Ma K, Lu Y.** Pyrolysis derived helically nitrogen-doped carbon nanotubes with uniform cobalt for high performance oxygen reduction, *Applied Surface Science*, 2020, vol. 504, N. 144380, pp. 1–6. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.144380

4. Zhang Y., Tan Y., Wang L., Li B., Ke Y., Liao M., Xu N., Chen J., Deng S. Electron emission and structure stability of carbon nanotube cold cathode driven by millisecond pulsed voltage, *Vacuum*, 2020, vol. 172, N. 109071, pp. 1–6. DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.109071

5. **Parveen S., Kumar A., Husain S., Husain M.** Fowler Nordheim theory of carbon nanotube based field emitters, *Physica B*, 2017, vol. 505, pp. 1–8. DOI: 10.1016/ j.physb.2016.10.031

6. Maity A., Das S., Sen D., Chattopadhyay K. K. Tailored CuO nanostructures decorated amorphous carbon nanotubes hybrid for efficient field emitter with theoretical validation, *Carbon*, 2018, vol. 127, pp. 510–518. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.11.018

7. Nawn D., Banerjee D., Chattopadhyay K. K. Zinc oxide nanostructure decorated amorphous carbon nanotubes: An improved field emitter, *Diamond and Related Materials*, 2013, vol. 34, pp. 50–59. DOI: 10.1016/j.diamond.2013.02.001

8. Bulyarskiy S. V., Bogdanova D. A., Kitsyuk E. P., Lakalin A. V., Pavlov A. A., Ryazanov R. M., Shamanaev A. A., Shaman Yu. P. Decreasing Work Function of Carbon Nanotubes Hydrogenated in Hydrogen Plasma, *Tech. Phys. Lett.*, 2018, vol. 44, pp. 432–434. DOI: 10.1134/S1063785018050164 (in Russian).

9. Bulyarskiy S. V., Dudin A. A., Lakalin A. V., Orlov A. P., Pavlov A. A., Ryazanov R. M., Shamanaev A. A. Stability of Field Emission from a Single Carbon Nanotube, *Tech. Phys.*, 2018, vol. 63, pp. 894—899. DOI: 10.1134/S1063784218060099 (in Russian).

Материаловедческие и технологические основы MHCT Science of materials and technological basics of MNST

УДК 539.232

DOI: 10.1757/nmst.22.255-263

Е. И. Крупкин, студент, e-mail: egor.krupkin99@mail.ru, **И. А. Аверин,** д-р техн. наук, проф., e-mail: nano-micro@mail.ru, **Е. А. Алимова,** аспирант, e-mail: alimova ea@mail.ru,

A. A. Карманов, канд. физ.-мат. наук, доц., e-mail: starosta07km1@mail.ru,

И. А. Пронин, д-р техн. наук, доц. каф., e-mail: pronin i90@mail.ru,

Н. Д. Якушова, ст. преп., e-mail: YakuchovaND@mail.ru,

ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет", каф. "Нано- и микроэлектроника"

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕНИ ОТЖИГА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК ОКСИДА ЦИНКА НА ИХ СТРУКТУРУ И ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Поступила в редакцию 22.02.2020

В рамках золь-гель-технологии разработана методика модификации структуры и фотокаталитических свойств пленок оксида цинка путем изменения времени отжига. С помощью растрового электронного микроскопа проведено исследование структуры пленок оксида цинка. Установлено, что при увеличении времени отжига с 15 мин до 1 ч происходит укрупнение ветвей наноструктуры оксида цинка, что можно объяснить процессами самоорганизации и кристаллизации структур. При дальнейшем увеличении времени отжига до 90 мин происходит частичное разрушение структуры. Исследовано влияние времени отжига на фотокаталитические свойства пленок оксида цинка на основе анализа реакции фотодеградации метилового оранжевого. Обнаружено, что при увеличении времени отжига от 15 до 60 мин наблюдается рост константы скорости реакции, а при увеличении времени отжига в диапазоне от 60 до 90 мин происходит ослабление фотокаталитических свойств, что можно объяснить изменениями структуры пленок.

Ключевые слова: пленки, оксид цинка, золь-гель-технология, время отжига, растровая электронная микроскопия, фотокатализ

Введение

Одной из проблем, которая стоит перед современными учеными, является разработка методик получения наноструктурированных материалов с заданными свойствами для различных областей науки и техники. Особый интерес представляют наноструктуры на основе широкозонных металлооксидных полупроводниковых материалов, одним из которых является оксид цинка ZnO. Наноструктуры на основе оксида цинка обладают рядом уникальных свойств, что позволяет их использовать в качестве чувствительных элементов газовых сенсоров [1—4] и датчиков вакуума [5]. Также на основе наноструктур оксида цинка разрабатываются альтернативные источники энергии [6], гидрофобные покрытия [7], биосенсоры [8] и элементы оптоэлектроники [9—11].

Наиболее перспективным применением наноструктурированных пленок оксида цинка являются фотокатализаторы, которые способны решить проблему очистки окружающей среды [12]. Оксид цинка, так же как и оксид титана [13], способен эффективно разлагать органические загрязнители под действием ультрафиолетового (УФ) излучения, что происходит благодаря генерации электронов и дырок в металлооксидном полупроводнике при поглощении квантов излучения. Более того, наноструктуры на пленках оксида цинка позволяют увеличить площадь соприкосновения катализатора и очищаемой среды, что способствует росту скорости разложения загрязнителей [14—17].

Основными задачами синтеза фотокатализаторов на основе оксида цинка являются расширение диапазона частот поглощаемого электромагнитного излучения и улучшение фотокаталитической активности пленок. Предлагают различные методы улучшения свойств пленок ZnO, например, в работах [14—16] для создания фотокаталитических пленок используют разные методы синтеза: термическое напыление [14], электроосаждение [15] и золь-гель-технологию [16]. Среди перечисленных методов наиболее дешевым и эффективным является синтез пленок на основе золь-гель-технологии, позволяющей управлять структурой и свойствами путем изменения условий синтеза. Так, в работе [16] исследовали влияние числа слоев, из которых состоит пленка ZnO, на эффективность разложения органических загрязнителей под действием $V\Phi$ излучения, а в работах [17, 18] аналогичные исследования были проведены для пленок оксида цинка, отожженных при разных температурах. Предлагаются различные методы модификации свойств пленок, синтезируемых с помощью зольгель-технологии. Так, в работе [19] рассматривается возможность улучшения фотокаталитической активности пленок ZnO за счет создания пористой структуры. В работах [20-23] авторы исследовали изменение фотокаталитических свойств оксида цинка при добавлении в них примесей железа [20], меди, марганца [21], сульфида висмута [22] и алюминия [23]. В работе [24] авторы смогли существенно улучшить фотокаталитические свойства пленок оксида цинка за счет введения примесей серебра и хлорида серебра, что можно объяснить изменением ширины запрещенной зоны и плазмонным эффектом.

Таким образом, существует множество модификаций методики синтеза пленок ZnO для повышения их фотокаталитической активности. Тем не менее возможности управления свойствами пленок оксида цинка путем изменения условий синтеза в рамках золь-гель-технологии еще не исчерпаны. Так, остается мало исследованным влияние времени отжига пленок оксида цинка на их фотокаталитические свойства. Регулирование этого условия синтеза позволит повысить эффективность фотокатализаторов. Поэтому целью данного исследования является модификация методики синтеза наноструктурированных пленок оксида цинка за счет изменения времени отжига и исследование влияния времени отжига пленок на структуру пленок и их фотокаталитические свойства.

1. Эксперимент

1.1. Синтез наноструктурированных оксидных пленок цинка

Синтез наноструктурированных пленок оксида цинка осуществляли в рамках золь-гель-технологии. Для синтеза наноструктурированных пленок были использованы следующие реактивы: ацетат цинка двуводный (CH₃COO)₂Zn · 2H₂O; 2-метоксиэтанол CH₃OCH₂CH₂OH и этаноламин HOCH₂CH₂NH₂ (производство *Sigma-Aldrich*, CША; степень чистоты — ЧДА).

Для получения наноструктурированных пленок был приготовлен золь [2, 12] путем смешения 10 г ацетата цинка двуводного, 20 мл 2-метоксиэтанола и 3,2 мл этаноламина. Получившуюся смесь перемешивали в течение 15 мин при комнатной температуре до получения однородного раствора. После этого золь перемешивали в течение 60 мин при температуре 60 °C с использованием магнитной мешалки ПЭ 6110 (фирма "Экохим", Россия). Полученный золь созревал 24 ч.

Пленки оксида цинка получали на лабораторной центрифуге 80-2 с частотой вращения 3000 об/мин на прямоугольные подложки из алюминиевой фольги размером 26 × 76 мм и толщиной 11 мкм. Сформированные пленки отжигали в муфельной печи ПМ-10 при температуре 500 °С. При этом было изготовлено шесть серий пленок оксида цинка с временами отжига 15, 30, 45, 60, 75, 90 мин.

1.2. Фотокатализ

Фотокаталитические свойства полученных пленок оксида цинка исследовали на примере реакции фотодеградации модельного органичес-

кого загрязнителя, в роли которого выступал метиловый оранжевый $C_{14}H_{14}N_3O_3SNa$. Реакция проводилась в водной среде под действием ультрафиолетового излучения.

Модельный раствор органического загрязнителя получали путем перемешивания 3,3 мг метилового оранжевого в 1 л дистиллированной воды. Концентрация загрязнителя в получившемся растворе равна ~10 ppm.

Для исследования фотокаталитических свойств наноструктурированных пленок оксида цинка алюминиевую фольгу с пленкой погружали в чашку Петри, в которой содержалось 40 мл раствора метилового оранжевого. Чашку Петри с пленкой и загрязнителем помещали на 1,5 ч под ультрафиолетовую лампу *HERAEUS NNI 290/154 XL* с максимумом излучения на длине волны

 $\lambda = 290$ нм. Для исследования скорости разложения органического загрязнителя каждые 15 мин из чашки Петри извлекали пробы раствора объемом 4 мл для измерения оптической плотности с помощью спектрофотометра СФ-56. При этом во время измерения ультрафиолетовую лампу выключали. После измерения пробу раствора выливали обратно в чашку Петри.

Для расчета концентрации раствора на основе коэффициента пропускания раствора использовали закон Бугера — Ламберта — Бера для растворов:

$$C = \frac{1}{\alpha l} \cdot \ln\left(\frac{100}{T}\right), \qquad (1)$$

где T — коэффициент пропускания раствора, %; α — коэффициент поглощения, м²/моль; $l = 10^{-2}$ м — ширина кюветы спектрофотометра.

Значение коэффициента $p = \frac{1}{\alpha l}$, необходимого для расчета концентрации загрязнителя, определяли экспериментально с использованием модельного раствора. Данный коэффициент равен $p = 15,3 \cdot 10^{-3}$ моль/м³.

2. Результаты

2.1. Анализ влияния времени отжига на структуру наноструктурированных пленок

С использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) VEGA3 проведен сравнительный анализ структуры пленок оксида цинка, полученных при разных временах отжига. На рис. 1 приведены РЭМ-изображения пленок оксида цинка, полученных при разных условиях отжига.

Анализ изображений пленок оксида цинка, полученных с помощью растрового электронного микроскопа, показывает, что все пленки имеют разветвленную иерархическую наноструктуру. Пленки состоят из волнообразных ветвей оксида цинка, которые образуют стягивающие



Рис. 1. Изображения наноструктурированных пленок ZnO, полученных при времени отжига: a - 15 мин; b - 30 мин; c - 45 мин; d - 60 мин; e - 75 мин; f - 90 мин



Рис. 2. Участки разрушенной наноструктурированной пленки оксида цинка, полученной при времени отжига 90 мин: *a* — промежуточная стадия разрушения; *b* — конечная стадия

перколяционные кластеры, что можно объяснить процессами кластер-кластерной агрегации в золе [2].

Важно отметить, что пленка оксида цинка, которую отжигали в течение 15 мин, состоит из ветвей толщиной около 1,5 мкм и более тонких ветвей толщиной 0,5...1 мкм. С увеличением времени отжига вплоть до 60 мин происходит значительное утолщение ветвей. Так, для пленок, отожженных в течение 30 мин, предельная толщина ветвей составляет 2,5 мкм. При времени отжига 45 мин появляются ветви толщиной 3...3,5 мкм, а при увеличении времени отжига до 60 мин растет число утолщенных ветвей и уменьшается число тонких ветвей.

Данные явления можно объяснить процессами самоорганизации в пленках из геля. В начале процесса отжига происходит формирование тонких ветвей оксида цинка благодаря процессам кластер-кластерной агрегации. После этого сформированные тонкие ветви ZnO выступают центрами формирования толстых ветвей. С увеличением времени отжига происходит утолщение формируемых ветвей вплоть до предельной толщины 3,5...4 мкм. Поэтому пленки со временами отжига 75 и 90 мин имеют практически такую же иерархическую структуру, что и пленки, которые отжигали в течение 60 мин. Это говорит о том, что при времени отжига 60 мин иерархическую структуру пленок ZnO можно считать полностью сформированной.

Важно отметить, что при временах отжига, больших 60 мин, начинается частичное разрушение структуры пленки оксида цинка. На рис. 2 представлены участки разрушенной пленки оксида цинка, которую отжигали в течение 90 мин. Разрушенная структура пленки состоит из распавшихся ветвей, которые включают отдельные частицы диаметром около 0,5...1 мкм. Разрушение пленки связано с появлением механических напряжений, вызывающих растрескивание пленки вследствие большой длительности высокотемпературного отжига.

Анализ структуры пленок оксида цинка, полученных при разных временах отжига, позволяет спрогнозировать фотокаталитические свойства пленок. Так, пленки, имеющие наибольшую толщину ветвей, будут иметь самое большое значение удельной площади поверхности, что способствует лучшему взаимодействию катализатора и загрязнителя в ходе реакции фотодеградации. Поэтому пленки оксида цинка, которые отжигали в течение 60 мин, будут иметь наилучшие каталитические свойства, а с уменьшением времени отжига каталитическая активность будет убывать. Однако при больших временах отжига будет наблюдаться уменьшение каталитической активности с ростом времени отжига вследствие разрушения структуры пленки, которое приводит к уменьшению удельной площади поверхности и резкому возрастанию числа собственных дефектов, препятствующих взаимодействию оксида цинка с молекулами загрязнителя.

2.2. Исследование влияния времени отжига на фотокаталитические свойства пленок ZnO

Фотокаталитические свойства пленок исследовали на примере реакции разложения метилового оранжевого под действием ультрафиолетового (УФ) света.



Рис. 3. Схема разложения метилового оранжевого под действием УФ излучения

В ходе проведения эксперимента обнаружено, что все пленки оксида цинка, полученные при разных временах отжига, обладают фотокаталитическими свойствами, которые обусловлены процессами фотогенерации носителей заряда в оксиде цинка под действием УФ излучения. На рис. 3 представлена подробная схема каталитической фотодеградации метилоранжа. Поверхность пленки поглощает фотоны УФ излучения, обладающие энергией 3,5...5 эВ (это соответствует излучению с длинами волн 250...350 нм). Энергии кванта УФ излучения достаточно, для того чтобы в полупроводнике произошла генерация пары носителей заряда — электрона *e* и дырки h^+ . Электроны зоны проводимости и дырки валентной зоны обладают достаточной энергией, для того чтобы вступить в реакцию с молекулами воды и растворенного кислорода. В ходе данных реакций образовывается множество активных короткоживущих радикалов ОН•, которые реагируют с метилоранжем и восстанавливаются до гидроксид-ионов ОН⁻, образуя безопасные продукты разложения (вода, карбонатионы, ионы натрия, нитрат-ионы, сульфат-ионы и др.) [12].

Реакция разложения метилоранжа с участием фотокатализатора является реакцией псевдопервого порядка, так как при установившемся световом потоке скорость генерации свободных носителей заряда остается постоянной.

В ходе исследования реакции разложения метилового оранжевого с использованием пленок оксида цинка с разными временами отжига были получены зависимости концентрации загрязнителя *C* от времени *t*, подчиняющиеся уравнению реакции первого порядка:

$$C(t) = C_0 \exp(-kSt), \qquad (2)$$

где C_0 — начальная концентрация загрязнителя; k — константа скорости реакции, зависящая от каталитических свойств пленки оксида цинка; S — площадь пленки.

В ходе исследования обнаружено, что с увеличением времени отжига происходят значительные изменения каталитических свойств пленок оксида цинка. Так, на рис. 4 представлены



Рис. 4. Временная зависимость относительной концентрации метилоранжа при использовании пленки оксида цинка со временем отжига:

1 — 15 мин; *2* — 30 мин; *3* — 45 мин; *4* — 60 мин



Рис. 5. Временная зависимость относительной концентрации метилоранжа при использовании пленки оксида цинка со временем отжига:

1 — 60 мин; *2* — 75 мин; *3* — 90 мин

кинетические кривые разложения метилового оранжевого при использовании пленок со временами отжига 15...60 мин, рассчитанные на основе экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Из анализа этих зависимостей следует, что с увеличением времени отжига от 15 до 60 мин происходит усиление фотокаталитических свойств пленок. Это объясняется тем, что при увеличении времени отжига в данном диапазоне происходит разрастание ветвей пленок оксида цинка и увеличение степени кристалличности оксида цинка. Это приводит к увеличению числа активных центров на поверхности пленки и удельной площади пленки.

Константы скорости реакции разложения метилоранжа при использовании наноструктурированных пленок оксида цинка с различными временами отжига

Время отжига, мин	Константа скорости реакции на единицу площади пленки, $c^{-1} \cdot m^{-2}$	Константа скорости реакции при площади пленки <i>S</i> = 1976 мм ² , c ⁻¹
15	0,0501	$0,99 \cdot 10^{-4}$
30	0,0547	$1,08 \cdot 10^{-4}$
45	0,0586	$1,16 \cdot 10^{-4}$
60	0,0664	$1,31 \cdot 10^{-4}$
75	0,0595	$1,18 \cdot 10^{-4}$
90	0,0506	$1,00 \cdot 10^{-4}$

Анализ рассчитанных кинетических кривых разложения метилоранжа для пленок со временем отжига 60—90 мин (рис. 5) показывает, что при увеличении времени отжига в данном диапазоне происходит ослабление каталитических свойств пленок, что можно объяснить процессами разрушения иерархической структуры пленок оксида цинка.

На основе кинетических кривых фотодеградации метилового оранжевого (см. рис. 4 и 5) рассчитывались константы скорости реакции разложения загрязнителя, которые приведены в таблице. Расчеты проводили на основе уравнения реакции первого порядка (уравнение (2)) с использованием численных методов аппроксимации экспериментальных данных. Из анализа данных таблицы можно сделать вывод, что для производства фотокатализаторов на основе наноструктурированных пленок оксида цинка необходимо использовать время отжига, равное 60 мин (константа скорости реакции равна $k = 1,31 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$). При увеличении и уменьшении времени отжига относительно t = 60 мин происходит ослабление фотокаталитических свойств.

Заключение

Разработана методика модификации структуры и фотокаталитических свойств наноструктурированных пленок оксида цинка, получаемых в рамках золь-гель-технологии, путем изменения времени отжига пленок.

Результаты исследования структуры пленок оксида цинка посредством растрового электронного микроскопа показали, что при увеличении времени отжига пленок оксида цинка в диапазоне от 15 до 60 мин происходит утолщение ветвей наноструктуры, что можно объяснить процессами самоорганизации и кристаллизации. Благодаря этому происходит увеличение удельной площади пленки и степени кристалличности, что приводит к усилению фотокаталитических свойств. При увеличении времени отжига от 60 до 90 мин происходит разрушение структуры пленок ZnO, уменьшение удельной площади и увеличение числа собственных дефектов, вследствие чего происходит ослабление фотокаталитических свойств пленок. Таким образом, оптимальное время отжига пленок оксида цинка для изготовления фотокатализатора равно 60 мин.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00924, а также стипендии Президента РФ (СП3800.2018.1).

Список литературы

1. Pronin I., Yakushova N., Averin I., Karmanov A., Moshnikov V., Dimitrov D. Investigation of Gas-sensitive Properties of Thin-Film Thermovoltaic Sensor Elements Based on Zinc Oxide // Coatings. 2019. V. 9. P. 693–701.

2. Dimitrov D. T., Nikolaev N. K., Papazova K. I., Krasteva L. K., Bojinova A. S., Peshkova T. V., Kaneva N. V., Pronin I. A., Averin I. A., Yakushova N. D., Karmanov A. A., Georgieva A. T., Moshnikov V. A. Investigation of the electrical and ethanol-vapour sensing properties of the junctions based on ZnO nanostructured thin film doped with copper // Applied Surface Science. 2017. Vol. 392. P. 95–108.

3. Pan Z., Sun F., Zhu X., Chen Z. Lin X., Zheng Y., Zhong W., Zhuang Z., Gu F. Electrodeposition-based of a ZnO-ordered macroporous film gas sensor with enhanced sensitivity // Journal of Materials Chemistry A. 2019. Vol. 7, N. 3. P. 1287–1299.

4. **Bhatia S., Verma N., Aggraval M.** Thermal, optical and gas sensing properties of ZnO films prepared by different techniques // The European Physical Journal Applied Physics. 2018. Vol. 81, N. 1. P. 10101.

5. Pronin I. A., Yakushova N. D., Averin I. A., Karmanov A. A., Moshnikov V. A. A model of the vacuum level effect on the sensor response of vacuum sensors based on nanostructured semiconductor oxide materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 387, N. 1.

6. Wang Z., Yang Y. Zhang L., Lin H., Znang Z. Wang D., Peng S., He D., Ye J., Gao P. Modulation-doped ZnO as high performance electron-selective layer for efficient silicon heterojunction solar cells // Nano Energy. 2018. Vol. 54. P. 99–105.

7. Ni S., Zhang H., Godwin P. M., Dai H. Xiao H. ZnO nanoparticles enhanced hydrophobicity for starch film and paper // Materials Letters. 2018. Vol. 230. P. 207–210.

8. Shetti N. P., Bukkitgar S. D., Kakarla R. R., Reddy C. Aminabhavi T. M. ZnO-based nanostructured electrodes for electrochemical sensors and biosensors in biomedical applications // Biosensors and Bioelectronics. 2019. P. 111417.

9. Singh C. C., Panda E. Zinc interstitial threshold in Aldoped ZnO film: Effect on microstructure and optoelectronic properties // Journal of Applied Physics. 2018. Vol. 123, N. 16. P. 165106.

10. Liu Z., Yang P. Optoelectronic performances on different structures of Al-doped ZnO // Journal of the American Ceramic Society. 2018. Vol. 101, N. 12. P. 5615–5626.

11. Foo K. L., Kashif M., Hashif U., Liu W.-W. Effect of different solvents on the structural and optical properties of zinc oxide thin films for optoelectronic applications // Ceramics International. 2014. Vol. 40. P. 753–761.

12. Крупкин Е. И., Аверин И. А., Пронин И. А., Карманов А. А., Якушова Н. Д. Получение наноструктурированных пленок оксида цинка и исследование их фотокаталитических свойств // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 1. С. 23—34.

13. **Fujishima A., Honda K.** Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode // Nature. 1972. Vol. 238. P. 37—38.

14. Fouad O. A., Ismail A. A., Zaki Z. I., Mohamed R. M. Zinc oxide thin films prepared by thermal evaporation deposition and its photocatalytic activity // Applied Catalysis B: Environmental. 2006. Vol. 62. P. 144–149.

15. Wanotayan T., Panpranot J., Qin J., Boonyongmaneerat Y. Microstructures and photocatalytic properties of ZnO films fabricated by Zn electrodeposition and heat treatment // Materials Science in Semiconductor Processing. 2018. Vol. 74. P. 232–237.

16. Alavi S., Bazrafshan H., Nikazar M. An investigation into the simultaneous influence of withdrawal speed and number of coated layers on photocatalytic activity of ZnO thin films // Jour. of sol-gel science and tech. 2017. Vol. 81. P. 652–661.

17. Lu J., Gong W., Huang K., Zhu J., Meng F., Song X., Sun Z. Effect of annealing temperature on photocatalytic activity of ZnO thin films prepared by sol – gel method // Superlattices and Microstructures. 2011. Vol. 50. P. 98–106.

18. Пронин И. А., Канева Н. В., Божинова А. С., Аверин И. А., Папазова К. И., Димитров Д. Ц., Мошников В. А. Фотокаталитическое окисление фармацевтических препаратов на тонких наноструктурированных пленках оксида цинка // Кинетика и катализ. 2014. Т. 55, № 2. С. 176—180.

19. **Pal B., Sharon M.** Enhanced photocatalytic activity of highly porous ZnO thin films prepared by sol — gel process // Materials Chemistry and Physics. 2002. Vol. 76, P. 82–87.

20. Zhang Y., Ram M. K., Stefanakos E. K., Goswami D. Y. Enhanced photocatalytic activity of iron doped zinc oxide nanowires for water decontamination // Surface and Coatings Technology. 2013. Vol. 217, P. 119–123.

21. Пронин И. А., Донкова Б. В., Димитров Д. Ц., Аверин И. А, Пенчева Ж. А., Мошников В. А. Взаимосвязь фотокаталитических и фотолюминесцентных свойств оксида цинка, легированного медью и марганцем // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48, Вып. 7. С. 868—874.

22. Velanganni S., Manikandan A., Prince J. J., Mohan C. N., Thiruneelakandan R. Nanostructured ZnO coated Bi_2S_3 thin films: Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue dye // Physica B: Condensed Matter. 2018. Vol. 545. P. 383–389.

23. Islam M. R., Rahman M., Farhad S. F. U., Podder J. Srucural, optical and photocatalysis properties of sol-gel deposited Al-doped ZnO thin films // Surface and Interfaces. 2019. Vol. 16. P. 120–126.

24. Yu J., Sun D., Wang T., Li F. Fabrication of Ag@ AgCl/ZnO submicron wire film catalyst on glasssubstrate with excellent visible light photocatalitic activity and reusability // Chemical Engineering Journal. 2018. Vol. 334. P. 225–236.

E. I. Krupkin, Student, e-mail: egor.krupkin99@mail.ru, I. A. Averin, D. Sci., Professor, Head of Department, nano-micro@mail.ru, E. A. Alimova, Graduate Student, alimova_ea@mail.ru, A. A. Karmanov, Ph. D., Associate Professor, starosta07km1@mail.ru, I. A. Pronin, D. Sci., Associate Professor, pronin_i90@mail.ru, N. D. Yakushova, Senior Lecturer, YakuchovaND@mail.ru, Penza State University, Penza, 440026, Russian Federation

Corresponding author: Krupkin Egor I., Student, Penza State University, Penza, 440026, Russian Federation, egor.krupkin99@mail.ru

Research of Influence of Annealing Time of Nanostructured Zinc Oxide Films on their Structure and Photocatalytic Properties

Received on February 22, 2020 Accepted on March 05, 2020

A technique for modifying of structure and photocatalytic properties of zinc oxide films by changing the annealing time was developed within the framework of the sol-gel technology. The structure of zinc oxide films was studied with the use of scanning electron microscopy. It was discovered that, increase of the branches of zinc oxide nanostructure occurs with increasing annealing time in the range 15–60 minutes, which could be due to processes of self-assembling and crystallization. Partial structure destruction occurs with increasing annealing time to 90 minutes. The influence of annealing time on photocatalytic properties of zinc oxide films was researched by analyzing methyl orange photodegradation. It was discovered that, growth of reaction rate constant occurs with increasing annealing time in the range 15–60 minutes, but diminution of reaction rate constant occurs with increasing annealing time in the range 60–90 minutes, which could be due to changes in the film structure.

Keywords: films, zinc oxide, sol-gel technology, annealing time, scanning electron microscopy, photocatalysis

For citation:

Krupkin E. I., Averin I. A., Alimova E. A., Karmanov A. A., Pronin I. A., Yakushova N. D. Research of Influence of Annealing Time of Nanostructured Zinc Oxide Films on their Structure and Photocatalytic Properties, *Nano-i* microsistemnaya tekhnika, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 255–263.

DOI: 10.17587/nmst.22.255-263

References

1. **Pronin I., Yakushova N., Averin I., Karmanov A., Moshnikov V., Dimitrov D.** Investigation of Gas-sensitive Properties of Thin-Film Thermovoltaic Sensor Elements Based on Zinc Oxide, *Coatings*, 2019, vol. 9, pp. 693–701.

2. Dimitrov D. T., Nikolaev N. K., Papazova K. I., Krasteva L. K., Bojinova A. S., Peshkova T. V., Kaneva N. V., Pronin I. A., Averin I. A., Yakushova N. D., Karmanov A. A., Georgieva A. T., Moshnikov V. A. Investigation of the electrical and ethanol-vapour sensing properties of the junctions based on ZnO nanostructured thin film doped with copper, *Applied Surface Science*, 2017, vol. 392, pp. 95–108.

3. Pan Z., Sun F., Zhu X., Chen Z. Lin X., Zheng Y., Zhong W., Zhuang Z., Gu F. Electrodeposition-based of a ZnO-ordered macroporous film gas sensor with enhanced sensitivity, *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, vol. 7, no. 3, pp. 1287–1299.

4. Bhatia S., Verma N., Aggraval M. Thermal, optical and gas sensing properties of ZnO films prepared by different techniques, *The European Physical Journal Applied Physics*, 2018, vol. 81, no. 1, pp. 10101.

5. Pronin I. A., Yakushova N. D., Averin I. A., Karmanov A. A., Moshnikov V. A. A model of the vacuum level effect on the sensor response of vacuum sensors based on nanostructured semiconductor oxide materials, *IOP Conference* Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol. 387, no. 1.

6. Wang Z., Yang Y., Zhang L., Lin H., Znang Z., Wang D., Peng S., He D., Ye J., Gao P. Modulation-doped ZnO as high performance electron-selective layer for efficient silicon heterojunction solar cells, *Nano Energy*, 2018, vol. 54, pp. 99–105.

7. Ni S., Zhang H., Godwin P. M., Dai H. Xiao H. ZnO nanoparticles enhanced hydrophobicity for starch film and paper, *Materials Letters*, 2018, vol. 230, pp. 207–210.

8. Shetti N. P., Bukkitgar S. D., Kakarla R. R., Reddy C. Aminabhavi T. M. ZnO-based nanostructured electrodes for electrochemical sensors and biosensors in biomedical applications, *Biosensors and Bioelectronics*, 2019, pp. 111417.

9. Singh C. C., Panda E. Zinc interstitial threshold in Aldoped ZnO film: Effect on microstructure and optoelectronic properties, *Journal of Applied Physics*, 2018, vol. 123, no. 16, pp. 165106.

10. Liu Z., Yang P. Optoelectronic performances on different structures of Al-doped ZnO, *Journal of the American Ceramic Society*, 2018, vol. 101, no. 12, pp. 5615–5626.

11. Foo K. L., Kashif M., Hashif U., Liu W.-W. Effect of different solvents on the structural and optical properties of zinc oxide thin films for optoelectronic applications, *Ceramics International*, 2014, vol. 40, pp. 753–761.

12. Krupkin E. I., Averin I. A., Pronin I. A., Karmanov A. A., Yakushova N. D. Poluchenie nanostrukturirovannykh plenok oksida tsinka i issledovanie ikh fotokataliticheskikh svoistv, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 23–34 (in Russian).

13. **Fujishima A., Honda K.** Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode, *Nature*, 1972, vol. 238, pp. 37–38.

14. Fouad O. A., Ismail A. A., Zaki Z. I., Mohamed R. M. Zinc oxide thin films prepared by thermal evaporation deposition and its photocatalytic activity, *Applied Catalysis B*: Environmental, 2006, vol. 62, pp. 144–149.

15. Wanotayan T., Panpranot J., Qin J., Boonyongmaneerat Y. Microstructures and photocatalytic properties of ZnO films fabricated by Zn electrodeposition and heat treatment, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2018, vol. 74, pp. 232–237.

16. Alavi S., Bazrafshan H., Nikazar M. An investigation into the simultaneous influence of withdrawal speed and number of coated layers on photocatalytic activity of ZnO thin films, *Journal of sol-gel science and technology*, 2017, vol. 81, pp. 652–661.

17. Lu J., Gong W., Huang K., Zhu J., Meng F., Song X., Sun Z. Effect of annealing temperature on photocatalytic activity of ZnO thin films prepared by sol – gel method, *Superlattices and Microstructures*, 2011, vol. 50, pp. 98–106.

18. Pronin I. A., Kaneva N. V., Bozhinova A. S., Averin I. A., Papazova K. I., Dimitrov D. Ts., Moshnikov V. A. Fotokataliticheskoe okislenie farmatsevticheskikh preparatov na tonkikh nanostrukturirovannykh plenkakh oksida tsinka, *Kinetika i kataliz*, 2014, vol. 55, no. 2, pp. 176–180 (in Russian).

19. **Pal B., Sharon M.** Enhanced photocatalytic activity of highly porous ZnO thin films prepared by sol – gel process, *Materials Chemistry and Physics*, 2002, vol. 76, pp. 82–87.

20. Zhang Y., Ram M. K., Stefanakos E. K., Goswami D. Y. Enhanced photocatalytic activity of iron doped zinc oxide nanowires for water decontamination, *Surface and Coatings Technology*, 2013, vol. 217, pp. 119–123.

21. Pronin I. A., Donkova B. V., Dimitrov D. Ts., Averin I. A., Pencheva Zh. A., Moshnikov V. A. Vzaimosvyaz' fotokataliticheskikh i fotolyuminestsentnykh svoistv oksida tsinka, legirovannogo med'yu i margantsem, *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2014, vol. 48, no. 7, pp. 868–874 (in Russian).

22. Velanganni S., Manikandan A., Prince J. J., Mohan C. N., Thiruneelakandan R. Nanostructured ZnO coated Bi_2S_3 thin films: Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue dye, *Physica B: Condensed Matter*, 2018, vol. 545, pp. 383–389.

23. Islam M. R., Rahman M., Farhad S. F. U., Podder J. Srucural, optical and photocatalysis properties of sol-gel deposited Al-doped ZnO thin films, *Surface and Interfaces*, 2019, vol. 16, pp. 120–126.

24. Yu J., Sun D., Wang T., Li F. Fabrication of Ag@ AgCl/ZnO submicron wire film catalyst on glasssubstrate with excellent visible light photocatalitic activity and reusability, *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 334, pp. 225–236.

УДК 620.3

DOI: 10.1757/nmst.22.263-271

Ю. В. Ануфриев^{1,2}, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., anufriev.u@inme-ras.ru, **Е. В. Зенова^{1,2},** д-р техн. наук, начальник отдела, **Э. Н. Воронков²,** д-р физ.-мат. наук, проф., voronkoven@mail.ru, **А. Р. Файрушин³**, канд. техн. наук, вед. специалист,

¹ Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва, РФ,

² Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва, РФ,

³ Micron Technology, USA

ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ ЭНТРОПИЙНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНОЙ В ТОНКОЙ ПЛЕНКЕ СТЕКЛООБРАЗНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА

Поступила в редакцию 05.03.2020

Согласно разработанным в последнее время теоретическим моделям, в одномерной двухфазной жидкости существуют звуковые волны, которые появляются как гибриды волн плотности и волн энтропии. В данной работе сообщается о результатах применения подобных моделей к полученным авторами экспериментальным результатам исследования генерации и распада акустического солитона в тонких пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников. Подтверждены основные предсказания модели. При этом экспериментально продемонстрирована возможность передачи энтропийной волной информации о возможном термодинамическом состоянии образца. Выполнены оценки возможной плотности перенесенной информации и скорости ее передачи.

Ключевые слова: энтропийные волны, передача термодинамической информации, энтропийная информатика, халькогенидные полупроводники, фазовые переходы

Введение

Современная цивилизация все чаще рассматривается как технологическая. Циклическое возникновение нового технологического уклада общества не только приводит к кардинальным изменениям в благосостоянии людей, их образе жизни, привычках, мышлении, но и создает базу для технологических достижений, основанных на новых фундаментальных открытиях [1-5]. Так, постепенный переход технологий к наноразмерам в области физики и к теории информации в области моделирования заложил основу для квантово-энтропийных представлений при создании новой технологической парадигмы [6-10]. Практическое воплощение этой парадигмы может явиться одним из драйверов очередного технологического цикла. Новый подход позволит по-новому интерпретировать некоторые из обнаруженных ранее эффектов, а также выполнить ранее немыслимые исследования, создающие базу современных технологий.

В данной работе речь идет о применении разработанной сравнительно недавно модели энтропийной волны в квантовых жидкостях [9, 10] к исследованиям генерации и распада акустических возбуждений в тонких пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) [11—13]. ХСП можно рассматривать как твердотельный аналог вязкой жидкости, находящейся в переохлажденном состоянии. Особенностью халькогенидных полупроводников является то, что они сравнительно легко переходят из стеклообразного состояния в кристаллическое. Этот фазовый переход, обусловленный коррелированными коллективными взаимодействиями в твердом теле, по своей природе является квантовым.

Существующая в природе информация создается и регистрируется при направленном энергетическом воздействии на тот или иной материальный объект. При этом любые изменения термодинамического состояния объекта приводят к изменению его энтропии. Так, например, при записи и обработке информации процессором в полупроводниковом кристалле под действием внешних электрических сигналов происходит изменение распределения зарядов локальных областей и, соответственно, свободной энергии и энтропии рабочего объема. В то же время в элементах фазопеременной памяти РСМ (от англ. Phase Chang Memory) при записи информации изменяется энтальпия и, соответственно, энтропия элемента памяти. То есть протекание любых физических процессов в рабочей среде функционального элемента сопровождается изменением его энтропии. Энтропия измеряет вероятность нахождения системы в одном из возможных ее состояний. В отличие от полной энергии энтропия изменяется даже в изолированной системе, характеризуя ее эволюцию. При этом энтропия локальных областей может как возрастать, так и уменьшаться, в то время как изменение полной энтропии системы всегда может быть только положительным. В случае равной вероятности всех возможных состояний системы уравнение для энтропии имеет вид [5]:

$$S = k \log W, \tag{1}$$

где k — постоянная Больцмана; W — вероятность возможного состояния системы. В работе [4] считается, что энтропия системы характеризует информацию, которой не достает до полного описания системы.

Таким образом, взаимодействие объектов может рассматриваться как процесс изменения не только энергетического, но и информационного состояния объекта. Исследования связи между энергетическими и информационными взаимодействиями в активных средах открывают определенные перспективы в создании новых типов информационных устройств и новых технологий. Это направление, осуществляющее изменение свойств физических объектов с помощью информационных воздействий и регистрирующее энтропийную информацию о происходящих в системе процессах, иногда называют физической или энтропийной информатикой [4].

В теоретической работе [9] было показано, что в одномерной двухфазной квантовой жидкости возникают комбинированные звуковые волны, состоящие из колебаний, вызванных локальными изменениями плотности среды и изменениями энтропии. При этом энтропийные волны способны передавать информацию о процессах в местах их формирования.

В данной работе авторы, на основе полученных ранее результатов, продемонстрировали существование подобного эффекта в ХСП. При этом наш подход к рассмотрению процессов в ХСП допускает, что свойства этой твердотельной среды аналогичны свойствам вязких жидкостей. Предполагается, что среда однородна во всех направлениях. Звуковые волны вызваны флуктуациями плотности, и их распространение в ХСП подчиняется тем же законам, что и в жидкостях. Скорость звука определяется адиабатической сжимаемостью, и для нее можно записать:

$$v_1 = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{\sigma}},\tag{2}$$

где *P*, ρ и σ — соответственно давление, плотность и энтропия единицы массы жидкости.

В работе [9] было высказано предположение, что если в жидкости типа ⁴Не элементарные возбуждения могут перемещаться относительно центра масс, то среда поддерживает два типа звуковых волн. Первый звук — это преимущественно колебания плотности жидкости ρ . Он похож на звук в обычных жидкостях; его скорость определяется формулой (2). Второй звук представляет собой волну энтропии, которая по большей части отделяется от колебаний плотности. Для скорости второго звука можно записать:

$$v_2 = \sqrt{\left(\frac{\rho_s \sigma^2}{\rho_n (\partial \sigma / \partial T)_{\rho}}\right)},$$
 (3)

где ρ_n и $\rho_s = \rho - \rho_n$ — плотности нормальной и второй компонентов жидкости соответственно.

Полагалось, что в ХСП может существовать второй тип волны, поскольку в расплавах этого материала возможно существование компонента, элементы которого могут смещаться относительно центра масс даже при термодинамическом равновесии. Вторая волна может быть связана с существованием микро- и нанокристаллов или их прокуроров, образовавшихся в переохлажденной жидкости. Соответственно, второй звук представляет собой энтропийную волну, несущую информацию о возможности существования в данной среде некоторой упорядоченной подсистемы. Энтропийная волна в основном отделена от флуктуаций плотности [9]. Для скорости волн справедливо:

$$\frac{v_1}{v_2} = d,\tag{4}$$

где d означает размерность. Одномерные квантовые жидкости не подвергаются сверхтекучему переходу. Тем не менее многие их свойства отражают свойства сверхтекучего ⁴Не. В частности, их низкоэнергетические возбуждения, обычно описываемые в рамках теории жидкости Томонага—Латтинжера [10], представляют собой бозоны, которые аналогичны фононам в ⁴He [9]. В этом режиме одномерная система ведет себя как сверхтекучая жидкость и поддерживает как первый, так и второй звуки. Соответственно, было сделано предположение, что в одномерном канале расплава ХСП также может существовать энтропийная волна, несмотря на то что ХСП не является сверхтекучей жидкостью.

Выполненные эксперименты показали, что расплав ХСП в искусственно созданном одномерном пространстве ведет себя как сверхтекучая жидкость и поддерживает как первый, так и второй звуки. При этом, обладая одинаковыми скоростями и разными температурами, обе волны образуют комбинированное акустическое возбуждение, как и предсказывалось в работе [9]. Волна с пониженной температурой была энтропийной и несла информацию о возможности формирования поликристаллической структуры, что и произошло при остановке волны в результате ее замерзания, в то время как материал первой волны остался в стеклообразном состоянии.

Таким образом, данная работа экспериментально подтверждает возможность существования комбинированных звуковых волн в сложных жидкостях и их аналогах. Возможный способ возбуждения этих волн и передачи с их помощью энтропийной информации продемонстрирован в стеклообразных полупроводниковых пленках. Выполнена оценка возможной плотности энтропийной информации и скорости ее передачи в пленках стеклообразных полупроводников.

1. Эксперимент

Экспериментальная установка схематически показана на рис. 1, a и 1, δ . Образец состоял из подложки с пленкой ХСП (CGS — Chalcogenide Glassy Semiconductor) и металлическими электродами (1, 2, 3). Металлические электроды связаны с генератором G. Верхний электрод подключен к верхнему положительному выводу генератора. Нижняя клемма электродов и нижняя клемма генератора заземлены, чтобы избежать какого-либо электростатического взаимодействия между ними. Генерируемое импульсное напряжение подавалось на образец через токоограничивающий резистор R. Образец помещали в магнитное поле H, вектор которого перпендикулярен плоскости подложки.



Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: a — традиционная схема; δ — модифицированная схема

Стеклообразная пленка имела состав As_2SeTe_3 , и металлические электроды были изготовлены из алюминия. Зазор между электродами варьировался в пределах 1...2 мм. Толщина пленки As_2SeTe_3 составляла 1...4 мкм. Температура плавления пленки As_2SeTe_3 была ~380 °C. Кристаллизация происходила при температуре не выше 220 °C. Скорость кристаллизации пленок XCП контролировалась скоростью нуклеации и температурой образца.

Все эксперименты проводили при комнатной температуре $T \cong 300$ К. Амплитуда прямоугольных импульсов, приложенных к образцу, варьировалась в интервале: 100...1000 В, длительности импульсов — в интервале 1...3 мс, с передним фронтом 0,1...1 мкс. Максимальная индукция магнитного поля была 2 Тл. Основные эксперименты проводили с одиночными импульсами. Последовательность импульсов была использована для проверки повторяемости результатов.

Во время импульсного электрического пробоя внутри токового канала возникал акустический солитон. Солитон двигался от анода 1 к катоду 2 [11]. Магнитное поле смещало токовый канал между электродами, так что последующие процессы не могли разрушить следы предыдущих процессов. Таким образом, магнитное поле помогло наблюдать эволюцию солитона с момента его появления и до его исчезновения. После электрического пробоя полупроводниковой пленки следы, оставленные солитоном на поверхности образца, были сфотографированы. Замкнутые пунктирные линии на рис. 1, а и 1, б обозначают области, фотографии которых представлены в данной работе (область А). Сложная конфигурация электродов на рис. 1, б вызвала изменение направления электрического поля в определенной точке пути солитона. Это нарушило стабильность комбинированного солитона и стимулировало его распад на компоненты.

Трек пробоя без магнитного поля был прямой, направленный нормально к электродам. Пробой имел стримерную природу, и образование солитона не наблюдалось [13]. В нашем случае исследуемый процесс развивался в канале электрического пробоя. Канал представлял собой одномерное пространство, похожее на очень тонкий капилляр.

В магнитном поле токовый шнур оставался прямолинейным и вел себя как проводник с током, перемещаемый силой Ампера. Во всех случаях зарождение солитона внутри канала имело место у анода. При перемещении солитон оставлял трек, который регистрировался визуально. По форме трека было возможно регистрировать скорость перемещения солитона вдоль канала под действием электрического поля внутри него и вдоль электродов под действием магнитного поля. Скорость движения токового шнура вдоль электродов рассчитывали по следующей формуле:

$$v = v_m \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{B^2 I^2}{mR} + \frac{r}{m}\right) t \right] \right\},\tag{5}$$

где B — индукция магнитного поля; I — электрический ток; m — масса шнура; R — сопротивление шнура; v_m — максимальная скорость шнура; r — коэффициент торможения шнура. Тормозящее действие среды и максимальную скорость шнура рассчитывали следующим образом:

$$r = C_{\eta \ \text{M}} \ v_m = \frac{IBl}{\frac{B^2 I^2}{R} + r}, \tag{6}$$

где *С* — константа; η — вязкость; *l* — длина шнура.

Результаты расчета удовлетворительно совпадали с результатами эксперимента. Расчетные зависимости скорости шнура для параметров, близких к экспериментальным, от времени и магнитной индукции показаны на рис. 2. На рис. 2, *а* показано изменение скорости шнура с солитоном в направлении, параллельном электродам (ось *x*) при B = 0,5 Тл (кривая *I*) и B = 1 Тл (кривая *2*). На рис. 2, *б* показана зависимость



Рис. 2. Зависимость скорости солитона вдоль электродов от времени (*a*) и зависимость максимальной скорости солитона вдоль электродов (пояснения в тексте) от индукции магнитного поля (*б*)

максимальной скорости солитона от индукции магнитного поля *B* при различных значениях коэффициента торможения *r*: $1 - 10^{-7}$ H·c/м; $2 - 2 \cdot 10^{-7}$ H·c/м; $3 - 4 \cdot 10^{-7}$ H·c/м; $4 - 8 \cdot 10^{-7}$ H·c/м.

Результаты

На рис. 3 показана фотография области A, обозначенной пунктирной линией на рис. 1, a. Номера 2 и 3 соответствуют обозначениям электродов на рис. 1, a. Буквы CGS обозначают область ХСП (от англ. Chalcogenide Glassy Semiconductor). Направления X и Y соответствуют осям X и Y на рис. 1, a.

Диаграмма движения солитона (рис. 3) показывает, что в области между электродами 2 и 3 солитон, встроенный в одномерный канал, дрейфовал от анода к катоду. При этом проводящий канал перемещался в CGS вдоль зазора между электродами). После входа в электрод 2 вид пути солитона изменился, он стал прямым. Это произошло потому, что магнитное поле перестало влиять на движение солитона. Это указывает на то, что солитон в металле потерял свою одномерную проводящую оболочку. Без одномерной оболочки движение акустической волны происходило в двумерном пространстве. Дорожка на электроде 2 (рис. 3) возникла в результате выгорания Al и CGS при прохождении горячего солитона. След солитона, потерявшего часть энергии, на заключительном этапе образован поликристаллической нитью. Движе-



Рис. 3. Фотография окончания пути солитона внутри заземленного электрода (область *A*, на рис. 1, *a*)



Рис. 4. Фотография участка пленки со следами распада солитона (возбуждение распространяется слева направо) и результаты моделирования распада солитона (вставка)

ние акустического солитона в вязкой среде привело к его постепенному затуханию на финальном отрезке пути.

На рис. 4 показана фотография области A, обозначенная пунктирной линией на рис. 1, δ . Номер 2 соответствует обозначению электрода на рис. 1, δ . Направления осей X и Y показывают направления осей X и Y на рис. 1, δ . Полупроводниковая область (CGS), через которую прошла акустическая волна, обозначена буквой A. Область, которая не была достигнута волной, обозначена буквой B. На вставке в верхнем углу показан результат моделирования обычного распада солитона в однородной среде [14].

Обе одиночные волны не только появились, но и остановились в один момент, уткнувшись в металлический электрод 2. С момента возникновения и до момента остановки волны прошли одно и то же расстояние. Отсюда следует, что $v_1 = v_2$. Это соответствует формуле (3). Прародителями обеих волн были компоненты гибридной волны, образовавшей солитон в момент его рождения. Таким образом, события в эксперименте развивались в соответствии со сценарием, описанным в работах [9, 10]. После распада солитона его компоненты превратились в одиночные волны, распространяющиеся в стекловидной среде. В момент их остановки обе волны были заморожены, одна в виде стекловидных капель (область LD) около пустого канала (L), другая — в виде поликристаллической нити (C). Картина распада солитона подтверждает, что он имел структуру, состоящую из двух волн: обычной и энтропийной. При остывании энтропийной волны возникла поликристаллическая структура, инициированная содержащейся в волне информацией.

Представляет интерес выполнить ориентировочную оценку плотности записи энтропийной информации и имевшую место скорость ее передачи. При выполненных оценках допускалось, что расстояние между электродами составляло 1 мм, диаметр канала, в котором перемещался солитон, был порядка его толщины, скорость звука ~10⁵ см/с,

длительность электрического импульса (смещавшего солитон) ~1 мс, расстояние, пройденное солитоном в направлении *x* с момента его появления до момента распада, было равно 1 см, движение было равномерным, площадь, с которой считывалась информация, примерно соответствует площади, на которой она записывалась $\approx 10^{-5}$ см². Объем этой области составлял $V \approx 10^{-9}$ см². Количество информации, записанной на этой площади (при таком же объеме) в современной матричной энергонезависимой памяти Flash или PCM, не превышает для поверхностной записи $I_s \approx 10^{11}$ бит и для объемной $I_v \approx 10^{15}$ бит. Пока речь может идти только об оценочных параметрах с точностью до порядка.

Оценим скорость считывания, допустив, что для современных одноканальных устройств скорость побитовой передачи составляет 10^{10} бит/с и в эксперименте время передачи энтропийной информации было равно длительности электрического импульса 1 мс. При этом, если считать, что построение поликристаллической структуры в результате прихода волны является расшифровкой сообщения, то в это же время входит и время расшифровки сообщения. Тогда отношение времени передачи современными методами к тому же количеству записанной, переданной и расшифрованной в эксперименте энтропийной волной составило бы ~ 10^5 . Это означает, что сообщение, которое энтропийная волна передала

за 1 мс традиционным методом цифровой связи, передавалось бы несколько часов. При всей грубости оценок, это впечатляет и заставляет задуматься.

Заключение

Основной результат рассмотренного эксперимента в том, что было показано существование двух типов звуковых волн с разной температурой и одной скоростью в твердотельных аналогах вязких жидкостей — стеклообразных полупроводниках. Акустические возбуждения, обнаруженные в пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников BO внешних электрическом и магнитном полях, могут быть объяснены на основе модели Томонага-Латинжера, разработанной для одномерной жидкости [9]. При этом экспериментально продемонстрирована возможность существования энтропийных волн и передачи с их помощью информации. Обнаружение эффекта стало возможным благодаря теоретически предсказанным условиям [9]: одномерное пространство, наличие частиц с разной массой и структурой, наличие внешнего магнитного поля. В то же время были существенные отличия эксперимента и теоретической модели: система имела внешнюю накачку энергии, исходная температура среды была 300 К, возникновение акустического возбуждения и его перемещение в одномерном канале осуществлялось при более высоких температурах.

Процессы формирования акустического солитона, его распространения и распада в фазовопеременной среде являются предметом отдельного исследования, которое выходит за рамки настоящей статьи. В данной работе передача энтропии была выполнена с помощью комбинированного звукового возбуждения в стеклообразной среде. Однако явление, по-видимому, носит общий характер, о чем свидетельствуют результаты исследования комбинированного оптического солитона длительностью в несколько пикосекунд и его распада [15], который происходил аналогично распаду комбинированного акустического солитона в данной работе.

Способ кодирования в энтропийных системах зависит как от среды, так и от происходящих в ней процессов [16]. Одним из существенных результатов данной работы является то, что рассматриваемые процессы, имеющие квантовую природу, ранее исследовали только при низких температурах, а приведенные в работе результаты были получены при комнатной и более высоких температурах.

Список литературы

1. Бурлачков В. К. Энергия, время, информация. Эволюция научных представлений. М.: ЛИБРОКОМ, 2012. 240 с.

2. Блюменфельд Л. А. Информация, термодинамика и конструкция биологических систем // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 7. С. 88—92.

3. **Ллойд С.** Программируя вселенную. Квантовый компьютер и будущее науки / Пер. А. Стативка. М.: Альпина нон-фикшн, 2014. 256 с.

4. **Гуревич И. М.** Законы информатики, квантовая механика и вопросы развития и происхождения вселенной. Продолжение и развитие идей Ллойда. М.: ЛЕНАНД. 2016. 264 с.

5. Абраимов С. Г., Ахатов И. Ш., Белоусов Ю. М., Михеенков А. В., Полищук И. Я. Рост энтропии в аналитической и квантовой механике. Фундаментальные основы механики. М.: ЛЕНАНД, 2020. 344 с.

6. Simpson R. E., Fons P., Kolobov A. V., Fukaya T., Krbal M., Yagi T., Tominaga J. Interfacial phase-change memory // Nature. Nanotechnology. Letters. Published online: 3 July 2011 | DOI: 10.1038/NNANO.2011.96

7. Landau L. D. The Theory of Super?uidity of Helium II // J. Phys. USSR 1941. N. 5. P. 71.

8. **Khalatnikov M.** An introduction to the theory of superfluidity. New York: Perseus, 2000.

9. Matveev K. A., Andreev A. V. Hybrid Sound Modes in One-Dimensional Quantum Liquids // Phys. Rev. 2018. Vol. 121, Iss. 2. P. 026803.

10. **Haldane F. D. M**. Luttinger liquid theory' of one-dimensional quantum fluids. I. Properties of the Luttinger model and their extension to the general 1D interacting spinless Fermi gas // J. Phys. C: Solid State Phys. 1981. Vol. 14. P. 2585—2609.

11. **Voronkov E. N.** Pulsed breakdown of chalcogenide glassy semiconductor films // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. September 2002. Vol. 4, N. 3. P. 793–798.

12. **Voronkov E. N.** Detection of a decay of an acoustic soliton arising during pulsed breakdown of glassy semiconductor film // JETP Letters. 1999. Vol. 70, Iss. 2. P. 72–74, Lett. 121.

13. **Fairushin A. R.** Research of a microplasma breakdown research in thin films of glassy semiconductors // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, June 2001. Vol. 3, No. 2. P. 499–502.

14. Маневич Л. И., Савин А. В., Смирнов В. В., Волков С. Н. Солитоны в невырожденных бистабильных системах // 1994. УФН. Т. 164, № 9. С. 937—958.

15. Golovchenko E. A., Dianov E. M, Prokhorov A. M., Serkin V. N. Decay of optical solitons // JETP Letters. July 1985. P. 87–91.

16. Rados A., Ostasiewicz K., Magnuszewski P., Damczyk J., Radosiński L., Kusmartsev F. V., Samson J. H., Mituś A. C., Pawlik G. Thermodynamics of entropy-driven phase transformations // Physical Review E. 2006. Vol. 73. P. 026127. Yu. V. Anufriev^{1,2}, Ph. D., Associate Professor, anufriev.u@inme-ras.ru, E. V. Zenova^{1,2}, D. Sc., Professor, Head of Department, E. N. Voronkov², D. Sc. Professor,

A. R. Fajrushin³, Ph. D., Principal Developer,

¹ National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation, Senior Researcher, Institute of Nanotechnology Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation,

² Institute of Nanotechnology Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation,

³ Micron Technology, Boise, Idaho, USA

Corresponding authors:

Anufriev Yuriy V., Ph. D., Associate Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation, Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Nanotechnology Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: anufriev.u@inme-ras.ru **Voronkov Edward N.,** D. Sc., Professor, Institute of Nanotechnology Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: voronkoven@mail.ru

Information Transmission by Entropy Acoustic Wave in a Chalcogenide Glassy Semiconductor Film

Received on March 05, 2020 Accepted on March 13, 2020

According to the recently developed theoretical models, one-dimensional quantum liquids do not undergo a superfluid transition. However, many of their properties reflect those of a superfluid. So in a two-phase fluid there are sound waves that appear as hybrids of density waves and entropy waves. In this paper, we report the results of applying similar models to the experimental results obtained by the authors in studying the generation and decay of an acoustic soliton in thin films of chalcogenide glassy semiconductors. The basic predictions of the model are confirmed. At the same time, the possibility of transmitting information on the possible thermodynamic state of a sample by an entropic wave was experimentally demonstrated. In the region of the entropy wave finish, the structure of one of the possible states of the semiconductor film was created.

The estimations of the possible information density and the rate of entropy information transfer in phase change films of chalcogenide semiconductors are made.

Keywords: entropy waves, information transfer, physical informatics, chalcogenide semiconductors, phase transitions

For citation:

Anufriev Yu. V., Zenova E. V., Voronkov E. N., Fajrushin A. R. Information Transmission by Entropy Acoustic Wave in a Chalcogenide Glassy Semiconductor Film, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 5, pp. 263–271.

DOI: 10.17587/nmst.22.263-271

References

1. **Burlachkov V. K.** Energy, time, information; The evolution of science. Moscow, LIBROKOM, 2012, 240 p.

2. **Bljumenfel'd L. A.** Information, thermodynamics and design of biological systems, *Soros educational journal*, 1996, no. 7, p. 89.

3. **Llojd S.** Programming the universe. Quantum computer and the future of science, Moscow, Al'pina non-fikshn, 2013.

4. **Gurevich I. M.** The laws of computer science, quat mechanics and the development and origin of the universe. Continuation and development of S. Llojds ideas, Moscow, LENAND, 2016, 264 p.

5. Abraimov S. G., Akhatov I. Sh., Belousov Yu. M., Mikheenkov A. V., Polishchuk I. Ya. Growth of entropy in analytical and quantum mechanics. Fundamentals of mechanics, Moscow, LENAND, 2020, 344 p. 6. Simpson R. E., Fons P., Kolobov A. V., Fukaya T., Krbal M., Yagi T., Tominaga J. Interfacial phase-change memory, *Nature. Nanotechnology. Letters*, Published online: 3 July 2011 | DOI: 10.1038/NNANO.2011.96

7. Landau L. D. The Theory of Superfluidity of Helium II, J. Phys. USSR 5, 1941, 71.

8. **Khalatnikov M.** An introduction to the theory of superfluidity. New York, Perseus, 2000.

9. Matveev K. A., Andreev A. V. Hybrid Sound Modes in One-Dimensional Quantum Liquids, *Phys. Rev.*, 2018, vol. 121, 026803.

10. Haldane F. D. M. Luttinger liquid theory' of one-dimensional quantum fluids. I. Properties of the Luttinger model and their extension to the general 1D interacting spinless Fermi gas, *J. Phys. C: Solid State Phys.*, 1981, 14, pp. 2585–2609.

11. Voronkov E. N. Pulsed breakdown of chalcogenide glassy semiconductor films, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, September 2002, vol. 4, no. 3, pp. 793–798.

12. **Voronkov E. N.** Detection of a decay of an acoustic soliton arising during pulsed breakdown of glassy semiconductor film, *JETP Letters*, 1999, vol. 70, no. 2, pp. 72–74.

13. **Fairushin A. R.** Research of a microplasma breakdown research in thin films of glassy semiconductors, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, June 2001, vol. 3, no. 2, pp. 499–502.

14. Manevich L. I., Savin A. V., Smirnov V. V., Volkov S. N. Solitons in non-degenerate bistable systems, *Ad*- vances in Physical Sciences, journal, 1994, vol. 164, no. 9, pp. 937-958.

15. Golovchenko E. A., Dianov E. M., Prokhorov A. M., Serkin V. N. Decay of optical solitons, *JETP Letters*, July 1985, pp. 87–91.

16. Rados A., Ostasiewicz K., Magnuszewski P., Damczyk J., Radosiński L., Kusmartsev F. V., Samson J. H., Mituś A. C., and Pawlik G. Thermodynamics of entropydriven phase transformations, *Physical Review E*, 2006, vol. 73, 026127.

УДК 621.362

DOI: 10.1757/nmst.22.271-276

М. Г. Мустафаев, канд. техн. наук, ассистент, **Γ. А. Мустафаев**, д-р техн. наук, проф., **Д. Г. Мустафаева**, канд. техн. наук, доц., dzhamilya79@yandex.ru, ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)", Владикавказ

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ В МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУРАХ

Поступила в редакцию 16.03.2020

Рассмотрено формирование системы межсоединений в микроэлектронных приборных структурах, определены влияющие факторы и пути снижения внутренних напряжений и обеспечения адгезии к подложке. Показано, что система межсоединений обеспечивает создание надежных и стабильных элементов и воспроизводимость процесса получения многослойных систем. Формирование межсоединений на основе материаловедческотехнологического подхода с учетом технологических, электрических и надежностных показателей позволяет улучшить параметры приборных структур и обеспечивает их воспроизводимость.

Ключевые слова: межсоединение, металлизация, изоляция, диэлектрик, технология, материал, адгезия, надежность, структура, подложка

Введение

Важную роль в интегральной электронике играют системы межсоединений, металлизации и изоляции, которые влияют на качественные характеристики элементов. Основными видами металлизации в элементах интегральной электроники являются: с прямым контактом, со слоем силицида, алюминия; со слоем барьерного металла; со слоем поликремния; с проколом перехода; многослойные системы [1, 2]. Для металлизации в основном используют алюминий и золото. В сложных и больших интегральных элементах используют многослойную металлизацию на основе барьерных металлов — никеля и титана.

Достижения современной электроники по созданию многофункциональных устройств и систем на основе интегральных элементов — больших и сверхбольших интегральных схем и увеличение степени их интеграции обусловлены успехами развития технологии в системе межсоединений [3—11]. Совершенствование технологии и высокая степень интеграции вызвали необходимость применения новых материалов и методов их получения [12—14]. Система межсоединений обеспечивает оптимизацию площади кристалла и снижение случайных дефектов в процессе создания элементов интегральной электроники (ЭИЭ).

В то же время система межсоединений обусловливает отказы, связанные с замыканием между уровнями металлизации, обрывами металлизации, с взаимодействием между оксидом и металлизацией при повышенных температурах и т. д. Качественное формирование металлического и оксидного покрытия со ступенчатым рельефом в системах межсоединений обеспечивается выбором материалов и методов их получения.

Формирование системы межсоединений в элементах интегральной электроники

На надежность межсоединений ЭИЭ влияют механические напряжения металлических и оксидных слоев. Анализ ЭИЭ показал, что первый уровень металлизации под слоем диэлектрика находится под действием значительных растягивающих напряжений, которые могут приводить к растрескиванию диэлектрика, разрыву металлизации, нарушению адгезии оксидных и металлических пленок, замыканию между уровнями металлизации и т. д., что создает определенные трудности обеспечения надежности контактов между соседними уровнями. Получение качественной металлизации ЭИЭ является трудно выполнимой задачей технологического характера.

Одним из требований к металлизации межсоединений ЭИЭ является обеспечение хорошей адгезии проводящих металлических пленок к подложке, а также ее сохранение при последующих обработках и эксплуатации приборов, особенно при высоких температурах. Повышенные требования к адгезии металлизации многоуровневых межсоединений связаны с большим разнообразием используемых материалов, трудностью согласования их свойств, значительным увеличением внутренних напряжений в многослойной системе металл-диэлектрик-металл. Адгезия материалов определяется не только их свойствами, но и степенью взаимодействия этих материалов на границе раздела [15-17], связь осуществляется либо за счет химической реакции на границе раздела фаз, либо под действием сил Ван-дер-Ваальса. В каждом случае энергии связи и свойства получаемых соединений будут различны.

Выбор материалов осуществляют с учетом свойств металлических пленок, определяющих качество их адгезии к оксидной подложке — теплоте образования оксидов. Хорошую адгезию к оксидной подложке имеют металлы с высокой отрицательной теплотой образования оксидов, в этом случае на границе раздела пленка—подложка происходит интенсивное взаимодействие с образованием пограничного слоя. Адгезия тугоплавких металлов выше, чем легкоплавких с одинаковой теплотой образования оксидов. Вероятно, это связано со значительно большей кинетической энергией частиц при конденсации пленок тугоплавких металлов.

Для лучшей адгезии металлических пленок межсоединений, в частности многоуровневых, формируется пограничный слой определенной толщины, обеспечивающий надежное сцепление пленки и подложки. Получение требуемых свойств на границе раздела возможно путем тщательного выбора контактирующих материалов и условий их получения. Качество обработки поверхности подложки перед металлизацией должно гарантировать отсутствие барьерных слоев на границе раздела фаз. Использование металлов с близким к подложке коэффициентом термического расширения уменьшает собственные внутренние напряжения, что также улучшает адгезию.

Использование кислородно-реактивных материалов на оксидных подложках эффективно для получения качественных промежуточных слоев, в частности металлов с большой теплотой образования оксидов (титан, вольфрам, молибден, тантал, хром и др.). Оптимальный режим получения металлических пленок для межсоединений и совместимость контактирующих материалов обеспечивают надежную адгезию металлизации.

Значение внутренних напряжений в тонких металлических пленках зависит от технологических параметров процесса их осаждения и последующих обработок [18]. Для многоуровневых межсоединений изменение внутренних напряжений в металлических проводящих пленках имеет существенное значение, так как даже в двухуровневой системе межсоединений нижний слой металлизации подвергается трехкратным термообработкам для осаждения последующих диэлектрических и металлических слоев. В системах с большим числом уровней число таких слоев и необходимых для их осаждения термообработок увеличивается, что повышает вероятность отказов вследствие отрицательного действия высоких внутренних напряжений. Это определяет достаточно высокие требования к материалам для металлизации, особенно нижнего уровня, которые находятся в более неблагоприятных с этой точки зрения условиях. Причиной ухудшения адгезии металлизации при последующих термообработках можно считать действие высоких внутренних напряжений в металлических пленках.

Целесообразно использовать разнотипные материалы для металлизации различных уровней межсоединений. Так, для нижнего уровня можно рекомендовать жесткие материалы с высоким модулем упругости и высокой отрицательной теплотой образования оксидов (вольфрам, молибден, тантал и др.). Сочетание этих свойств позволяет получать межсоединения с минимальными значениями внутренних напряжений и хорошей адгезией к подложке. Для металлизации верхнего слоя межсоединений можно использовать алюминий. Многочисленные достоинства делают его наиболее предпочтительным, а значение внутренних напряжений, которое определяет низкий модуль упругости, можно снизить с помощью технологических приемов.

Надежность межсоединений обеспечивается применением высококачественных диэлектриков, которые, помимо высокой диэлектрической прочности, низких механических напряжений, хорошей адгезии, должны быть хорошо совместимы с материалами примыкающих к ним слоев многоуровневых межсоединений, не оказывая на них какого-либо вредного воздействия, быть технологичными при нанесении и последующей обработке. Сохранение поверхностной однородности металлизации тугоплавкими металлами гарантирует высокую надежность многоуровневых межсоединений вследствие отсутствия трещин в межслойном диэлектрике и, таким образом, замыканий между уровнями.

Для обеспечения качества и надежности диэлектрических покрытий необходимо оптимальное сочетание материалов металлизации и диэлектрика, условий их получения и термообработок. Получение качественных многоуровневых межсоединений обеспечивается низкой плотностью микропор в межслойном диэлектрике для исключения возможности замыканий между уровнями металлизации. Термообработка диэлектрических пленок после осаждения влияет на их характеристики, вследствие изменения внутренних напряжений, обусловленных термическими и структурными факторами.

Термические напряжения возникают во время осаждения пленки и распределены неравномерно по всей толщине системы пленка—подложка. Их значение максимально на границе раздела пленка—подложка, минимально на внешней поверхности пленки и определяется различием температурных коэффициентов расширения пленки и подложки. Для многих диэлектрических пленок значение термических напряжений прямо пропорционально толщине пленки. Соотношение температурных коэффициентов расширения пленки и подложки влияет не только на значение, но и на знак термических напряжений.

В многослойных структурах с чередующимися слоями металла и диэлектрика свойства диэлектрических пленок существенным образом зависят не только от условий их получения и свойств нижнего слоя межсоединений, но определяются также материалом и режимами получения верхнего слоя межсоединений. Применение технологических приемов, например медленное охлаждение, после процесса осаждения верхнего слоя межсоединений приводит к значительному снижению внутренних напряжений, вызванных разницей коэффициентов термического расширения металлической и диэлектрической пленок. Медленное охлаждение проводят после любых термообработок алюминиевой металлизации. В этих условиях обеспечивается низкая скорость рекристаллизации и, следовательно, минимальное нарушение однородности поверхности металлизации, снижение внутренних напряжений в диэлектрической пленке.

Значительные требования к качеству и надежности металлизации [19, 20] межсоединений определили создание одно- и многослойных систем. В однослойных системах металлизации применяют тугоплавкие металлы — молибден, вольфрам, а в многослойных — хром—золото, молибден-золото, вольфрам-золото, титанплатина—золото и др. Многослойные системы содержат проводящий слой и слой, обладающий хорошей адгезией к подложке. Для исключения взаимной диффузии между слоями вводится дополнительный барьерный слой. Система межсоединений, состоящая из чередующихся проводящих и диэлектрических слоев, вызывает необходимость подбора материалов каждого слоя и технологии их получения.

Для получения минимальных потерь проводимости межсоединений необходимо использовать хорошо проводящие металлы, которые имеют низкое омическое сопротивление с кремнием. Подслой из силицида платины значительно снижает контактное сопротивление при средних значениях сопротивления кремния, приводит к получению одинакового сопротивления контакта независимо от вида используемого металла. Это указывает на то, что потенциальным барьером при создании контакта является граница раздела силицид платины—кремний.

Надежность ЭИЭ существенно зависит от качества системы металлизации, технологических возможностей материала, минимальных размеров токоведущих дорожек. Вследствие этого применение новых материалов для межсоединений позволяет улучшить качество и их характеристики.

Использование низкотемпературных систем металлизации значительно ограничивает температурный диапазон процесса получения диэлектрических слоев. С повышением температуры осаждения качество межслойного диэлектрика повышается. Приблизиться по основным параметрам к термическому оксиду возможно, используя межсоединения из тугоплавких металлов.

Достоинством металлизации тугоплавкими металлами является возможность получить надежную многоуровневую систему межсоединений. Это обусловлено высокой температурой плавления металлов, что гарантирует отсутствие дополнительных деформаций, возникающих при последующих термообработках межсоединений, вплоть до температур в диапазоне 800...1100 °С.

Формирование межсоединений, металлизации и изоляции в микроэлектронных приборных структурах

С увеличением интеграции и с уменьшением размеров элементов при выполнении межсоединений сечение проводников уменьшается, сопротивление токоведущей дорожки возрастает, их суммарная длина растет. При масштабировании возможны возрастание волнового сопротивления, электромиграция, ухудшение характеристик межсоединений и т. д. При этом могут возникать трудности по прохождению сигнала по линии межсоединения.

В элементах большой степени сложности реализуются несколько уровней металлизированной разводки. Основной причиной отказов элементов интегральной электроники является нарушение металлизации.

При разработке, проектировании, изготовлении металлизации необходимо учитывать определенные требования: технологические, электрические и надежностные. К технологическим требованиям можно отнести ограниченный выбор материала для межсоединений — в основном используются алюминий и сплавы на его основе. Межсоединения нижнего уровня, обеспечивающие подсоединение активных и пассивных элементов, выполняются на основе силицида платины. Использование металлов, образующих силициды, обеспечивает низкое контактное сопротивление. В качестве межуровневых диэлектриков используют диоксид и нитрид кремния, что позволяет сократить площадь перехода.

К электрическим требованиям можно отнести минимальное влияние сопротивления контактов к полупроводниковым областям и емкости металлизированных соединений на параметры приборов и на быстродействие больших интегральных схем соответственно.

К требованиям надежности можно отнести снижение рельефа структуры, устойчивость металлических соединений к электромиграции, минимизации площади разводки. Снижение влияния рельефа обеспечивается применением поликремния и силицида платины.

В устройствах на основе интегральной электроники для изоляции дорожек токоведущей металлизации друг от друга в многослойных системах и от полупроводниковых слоев в функциональных элементах полупроводникового устройства используют слои диэлектрика. При создании систем изоляции возникают определенные трудности технологического характера, связанные с обеспечением разных значений диэлектрических постоянных для подзатворного и межслойного изолирующего диэлектриков. Материалы с большой диэлектрической проницаемостью позволяют повысить толщину слоя диэлектрика и диэлектрическую проницаемость, уменьшить токи утечки.

Применение материалов с большими значениями диэлектрической проницаемости позволяет уменьшить размеры электронного устройства при заданной частоте, устройства работают на меньших длинах волн с меньшими фазовыми скоростями. При этом плотность энергии электрического поля увеличивается. Материалы с большими значениями диэлектрической проницаемости обеспечивают малые размеры, лучшее качество соединений, меньшие потери на излучение.

Заключение

Для межсоединений в интегральной электронике применяют металлы, образующие силициды. В качестве межуровневых диэлектриков используют диоксид кремния и нитрид кремния, их применение позволяет сократить площадь перехода. Снижение влияния рельефа проводников при разводке в структуре обеспечивается применением поликремния и силицида платины. Качество металлизации тугоплавкими металлами позволяет сохранить однородность ее поверхности в процессе осаждения межслойного диэлектрика и последующих слоев металлизации. Это свойство пленок из тугоплавких металлов сделало возможным их использование для металлизации нижнего и верхнего уровней многоуровневых межсоединений. Системы межсоединений, выполненные на основе тугоплавких металлов, свободны от недостатков, присущих более легкоплавким системам, обеспечивают воспроизводимость параметров, высокие технические характеристики и надежность системы межсоединений элементов интегральной электроники. Формирование системы межсоединений в элементах интегральной электроники обеспечивает хорошую адгезию к подложке, создание надежных и стабильных элементов и воспроизводимость процесса.

Список литературы

1. Громов Д. Г. Металлизация в системах с наноразмерными элементами. М.: Изд. МИЭТ, 2011. 204 с.

2. **Черняев В. Н.** Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. М.: Радио и связь, 1987. 320 с.

3. **Таруи Я.** Основы технологии СБИС. М.: Радио и связь, 1985. 286 с.

4. Andricacos P. C., Uzoh C, Dukovic J. O. et al. // IBM J. Res. Dev. 1998. Vol. 42. P. 567.

5. Hussein M., Sivakumar S., Brain R. et al. // International Interconnect Technology Conference 2002, Proceedings of the IEEE 2002 International. 2002. P. 18–20.

6. **Rosenberg R., Edelstein D. C., Hu C.-K.** et al. // Rev. Mater. Sci. 2000. Vol. 30, P. 229–262.

7. Cabral C., Andricacos P. C., Cignac L. M. et al. // Adv. Metallization Conf. Proc., ULSI XIV. 1998. Vol. 81. 8. Plombon J. J., Andideh E., Dubin V. et al. // Applied Physics Letters. 2006. Vol. 89. P. 113124.

9. **Reid J., Mayer S.** // Proc. of the Adv. Metallization Conf. MRS, Warrendale, PA. 2000. P. 53–58.

10. Moffat T., Bonevich J., Huber W. et al. // J. Electrochem. Soc. 2000. Vol. 147. P. 4524—4535.

11. Reid J., Mayer S., Broadbent E. et al. // Solid State Technology. 2000. Vol. 43. P. 86.

12. 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.

13. 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.

14. **Мустафаев М. Г., Мустафаева Д. Г.** Моделирование и алгоритмизация неравновесных процессов при создании микроэлектронных приборных структур // Нанои микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 6. С. 346—356.

15. Технология тонких пленок // Под ред. Л. Майселла, Р. Гленга. М.: Советское радио, 1977. 664 с.

16. **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.

17. **Комник Ю. Ф.** Физика металлических пленок. Размерные и структурные эффекты. М.: Атомиздат, 1979. 196 с.

18. Чопра К. Л. Электрические явления в тонких пленках. М.: Мир, 1972. 260 с.

19. Любимова Л. К. Металлизация в полупроводниковых приборах // Электронная техника. Сер. 2. 1977. Вып. 3. С. 35—38.

20. Лихтман Е. Н., Донишев Б. Г. Многослойные контактные системы на основе молибдена и алюминия // Электронная техника. Сер. 2. 1971. Вып. 4. С. 46—51.

M. G. Mustafaev, Ph. D., Assistant, G. A. Mustafaev, D. Sc., Professor,

D. G. Mustafaeva, Ph. D., Associate Professor, dzhamilya79@yandex.ru

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation

Corresponding author:

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

Material-Technological Approach in the Formation of Interconnects in Microelectronic Device Structures

Received on March 16, 2020 Accepted on March 23, 2020

The formation of a system of interconnects in microelectronic device structures is considered, the influencing factors and ways to reduce internal stresses and ensure adhesion to the substrate are determined. It is shown that the interconnect system provides the creation of reliable and stable elements, and the reproducibility of the process of obtaining multilayer systems, the formation of interconnections based on the material science and technology approach, taking into account technological, electrical and reliability indicators, allows to improve the parameters of instrument structures, and ensures their reproducibility. The reliability of interconnects of microelectronic device structures is affected by mechanical stresses of metal and oxide layers, which leads to cracking of the dielectric, rupture of metallization, violation of adhesion of oxide and metal films, short circuit between metallization levels under the action of tensile stresses, and makes it difficult to ensure reliable contacts between adjacent levels. When metallizing interconnects in microelectronic device structures, ensuring good adhesion of conductive metal films to the substrate, as well as its preservation during subsequent processing and operation of devices, at high temperatures, can significantly increase the reliability of devices. Increased requirements for metallization adhesion of multilevel interconnects are associated with a wide variety of materials used, the difficulty of matching their properties, a significant increase in internal stresses in a multilayer metaldielectric-metal system. Reliability of the interconnects is ensured by the use of high-quality dielectrics, which, in addition to high dielectric strength, low mechanical stresses, good adhesion, are well compatible with the materials of adjacent layers of multi-level interconnects, without any harmful effects on them, to be technologically advanced during application and subsequent processing. Preservation of surface uniformity of metallization by refractory metals guarantees high reliability of multilevel interconnects due to the absence of cracks in the interlayer dielectric and short circuits between levels.

Keywords: interconnect, metallization, insulation, dielectric, technology, material, adhesion, reliability, structure, substrate

For citation:

Mustafaev M. G., Mustafaev G. A., **Mustafaeva D. G.** Material-Technological Approach in the Formation of Interconnects in Microelectronic Device Structures, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2020, vol. 22, no. 5, pp. 271–276.

DOI: 10.17587/nmst.22.271-276

References

1. **Gromov D. G.** Metallizacija v sistemah s nanorazmernymi jelementami, Moscow, MIJeT, 2011. 204 p. (in Russian).

2. **Chernjaev V. N.** Tehnologija proizvodstva integral'nyh mikroshem i mikroprocessorov. Moscow, Radio i svjaz', 1987. 320 p. (in Russian).

3. **Tarui Ja.** Osnovy tehnologii SBIS. Moscow, Radio i svjaz', 1985. 286 p. (in Russian).

4. Andricacos P. C., Uzoh C., Dukovic J. O. et al., *IBM J. Res. Dev.*, 1998, vol. 42, p. 567.

5. Hussein M., Sivakumar S., Brain R. et al., International Interconnect Technology Conference 2002, Proceedings of the IEEE 2002 International, 2002, pp. 18–20.

6. Rosenberg R., Edelstein D.C, Hu C.-K. et al., *Rev. Mater. Sci.* 2000, vol. 30, pp. 229–262.

7. Cabral C., Andricacos P. C., Cignac L. M. et al., Adv. Metallization Conf. Proc., ULSI XIV, 1998, vol. 81.

8. Plombon J. J., Andideh E., Dubin V. et al., *Applied Physics Letters*, 2006, vol. 89, p. 113124.

9. Reid J., Mayer S., Proc. of the Adv. Metallization Conf. MRS, Warrendale, PA, 2000. P. 53.

10. Moffat T., Bonevich J., Huber W. et al., J. Electrochem. Soc., 2000, vol. 147, p. 4524.

11. Reid J., Mayer S., Broadbent E. et al., *Solid State Technology*, 2000, vol. 43, p. 86.

12. 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).

13. **Mustafaev G. A., Mustafaeva D. G., Mustafaev M. G.** Poluchenie odnorodnyh po strukture i ravnomernyh po tolshhine dijelektricheskih pokrytij pri formirovanii pribornyh struktur, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 131–136 (in Russian).

14. **Mustafaev M. G., Mustafaeva D. G.** Modelirovanie i algoritmizacija neravnovesnyh processov pri sozdanii mikrojelektronnyh pribornyh struktur, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 6, pp. 346–356 (in Russian).

15. **Tehnologija** tonkih plenok, Ed. L. Majsella, R. Glenga, Moscow, Sovetskoe radio, 1977, 664 p. (in Russian).

16. **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).

17. **Komnik Ju. F.** Fizika metallicheskih plenok. Razmernye i strukturnye jeffekty, Moscow, Atomizdat, 1979. 196 p. (in Russian).

18. **Chopra K. L.** Jelektricheskie javlenija v tonkih plenkah, Moscow, Mir, 1972, 260 p. (in Russian).

19. **Ljubimova L. K.** Metallizacija v poluprovodnikovyh priborah, *Jelektronnaya tekhnika*, ser. 2, 1977, is. 3, pp. 35—38 (in Russian).

20. Lihtman E. N., Donishev B. G. Mnogoslojnye kontaktnye sistemy na osnove molibdena i aljuminija, *Jelektronnaya tekhnika*, ser. 2, 1971, is. 4, pp. 46–51 (in Russian).

Моделирование и конструирование MHCT Modelling and designing of MNST

УДК 621.314

DOI: 10.1757/nmst.22.277-282

С. В. Гандилян, канд. техн. наук, доц., e-mail: GandilyanSV@mgsu.ru, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (кафедра физики и аэродинамики), Москва

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОВМЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОИНДУКЦИОННЫХ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ И ИХ СИСТЕМ

Поступила в редакцию 09.02.2020

На основе базовых положений бинарно-сопряженной электрофизики осуществлена обобщенная Лагранжевая формулировка процессов энергопреобразования в микроэлектромеханических системах с электромагнитоиндукционными (индуктивно-емкостными) структурными элементами возбуждения. Рассматриваются некоторые узловые вопросы определения динамических и энергетических характеристик микроэлектромеханических преобразователей энергии и их систем (МЭМС), если в структурах их функциональных элементов возбуждения имеются активные наноструктурированные материалы дуального назначения, в которых при отсутствии внешних электромагнитных полей наблюдаются и намагниченность, и электрическая поляризация, так называемые сегнетоэлектромагнетики.

Ключевые слова: бинарно-сопряженная электрофизика, диэлектрик, сегнетомагнетик, электромагнитоиндукционные микроэлектромеханические преобразователи, наноструктурированное материаловедение

Введение

В зависимости от принципа осуществления (реализации) взаимного преобразования электромагнитной и механической энергии технические электромеханические преобразователи (ЭМП) энергии и их системы во всем диапазоне энергетического спектра (от точки минимума $P_{\rm min} \approx 0.6 \cdot 10^{-8}$ Вт — мощность самого маломощного нанодвигателя, до точки максимума $P_{\rm max} \approx 160$ МВт — мощность самого мощного турбогенератора, созданного человеком) подразделяются на три больших класса:

- электроиндукционные (индуктивные) ЭМП энергии, в которых рабочим полем является магнитное поле;
- магнитоиндукционные (емкостные) ЭМП энергии, в которых рабочим полем является электрическое поле;
- электромагнитоиндукционные (индуктивноемкостные) ЭМП энергии, в которых электромеханическое преобразование осуществляется и магнитным, и электрическими полями [1, 2].

Принципиальные схемы классификации ЭМП энергии по принципу действия приведены на рис. 1.

Научно-технические основы применения наноструктурного материаловедения в системах совмещенных электромагнитоиндукционных микроэлектромеханических преобразователей энергии

В работах [3, 4] на базе сравнительного анализа динамических, энергетических и структурных характеристик индуктивных и емкостных ЭМП энергии было установлено следующее важное обстоятельство.

Совместное применение индуктивных и емкостных ЭМП энергии в общем объеме одного агрегата в макросистемной электромеханике неэффективно, так как индуктивные ЭМП энергии являются источниками ЭДС, а емкостные ЭМП — источниками тока. Такая совмещенная система представляла бы гибрид источников низкого и сверхвысокого напряжения и имела бы низкий КПД.

В макросистемной электромеханике определенный интерес представляют совмещенные системы, состоящие из последовательного и параллельного соединения индуктивных и емкостных ЭМП энергии. При возникновении резонансных режимов в таких системах их энергетичес-

кие характеристики наилучшие, так как происходит обмен реактивной мощностью между индуктивной и емкостной подсистемами, и для создания магнитного и электрического полей совмещенный ЭМП энергии перестает потреблять реактивную мощность от внешних источников энергии.

Совершенно иная ситуация в современной микросистемной электромеханике. В настоящее время в передовых научных центрах развитых стран (США, Япония, страны ЕС, Россия, Китай и др.) ведутся интенсивные исследования по созданию новых материалов электротехнического назначения с достаточно высокими показателями как ферромагнитной, так и сегнето-электрической составляющей — материалов, в которых при отсутствии внешних электромагнитных полей наблюдаются и остаточная намагниченность, и электрическая поляризация.

Сегодняшние модификации этих материалов, которые изначально называли магнитными сегнетоэлектриками (сегнетомагнетиками), могут быть с успехом применены в разработке и создании новых схем и компонентов микросистемного электрооборудования, где базовыми эле-



Рис. 1. Классификация электродинамических преобразователей энергии по принципу действия:

L — электроиндукционные (индуктивные) ЭМП энергии; С — магнитоиндукционные (емкостные) ЭМП энергии; LC — электромагнитоиндукционные (индуктивно-емкостные) ЭМП энергии

ментами являются совмещенные индуктивноемкостные микроминиатюрные и наноэлектромеханические преобразователи энергии и их системы (МЭМС и НЭМС). При этом на практическое воплощение идеи индуктивно-емкостной микросистемной электромеханики сильное воздействие может оказывать развитие магистрального направления современной нанонауки наноструктурированного материаловедения (нанокристалического, нанокомпозитного, нановолокнистого и т. д.) [5].

Хорошим примером является создание совмещенных наноструктур на основе проявления эффекта самоорганизации при одновременном осаждении на подложку двух веществ: магнитострикционного (например, шпинели — $C_0 Fe_2 O_4$) и пьезоэлектрического (например, титанита бария — ВаТіО₃ или феррита висмута — ВіFeO₃), так как, изменяя кристаллографическую ориентацию подложки, можно выращивать как магнитострикционные столбики в пьезоэлектрической матрице, так и пьезоэлектрические столбики в магнитострикционной матрице. В результате удается осуществить атомную инженерию (атомную сборку) и получить искусственный магнитоэлектрический материал как совмещенную систему нелинейно взаимодействующих электрических и магнитных подсистем.

Системный анализ выполненных в этой области фундаментальных исследований на рубеже XX и XXI столетий приведен в многочисленных зарубежных и российских публикациях, например в работах [6—10].

Практические результаты этих исследований устанавливают широкий спектр перспективного применения совмещенных наноструктурированных магнитоэлектрических материалов не только в области микросистемной электромеханики (например, в области природоподобной робототехники), но и в области микроэлектромеханики, занимающей самый низкий уровень шкалы мощностей макросистемной электромеханики (не выше 1 кВт) и являющейся основной технической базой автоматизации множества современных технологических процессов [11].

Некоторые вопросы физико-математического моделирования совмещенных электромагнитоиндукционных микроЭМП энергии

Для развития электромагнитоиндукционной (индуктивно-емкостной) электромеханики (осо-

бенно на микросистемном уровне) представляется особенно важным совершенствование существующих теоретических моделей, позволяющих учитывать большое число взаимосвязанных факторов, определяющих основные динамические и энергетические характеристики функциональных элементов ЭМП энергии.

В настоящей работе предлагается новый подход к решению некоторых узловых вопросов обобщенного физико-математического моделирования и расчета энергетических характеристик на базе простой эквивалентной схемы индуктивно-емкостной ЭМП энергии, содержащей минимальное число элементов: емкостей, индуктивностей и сопротивлений (рис. 2).

Более корректное решение этих вопросов можно осуществить на основе базовых принципов бинарно-сопряженной электрофизики, исходя из Лагранжа—Максвелловской трактовки теоретических основ современной электромеханики, некоторые узловые положения которой рассмотрены в работах [3, 12].

Если в структурных элементах системы возбуждения совмещенной ЭМП энергии имеются активные материалы дуального назначения, то в эквивалентной электрической схеме их можно представить как своеобразную систему динамической индуктивности L_f (как эквивалент магнитострикционной части материала) и динамической емкости C_f (как эквивалент пьезоэлектрической части материала), связанных между собой механически жесткими и электрофизически нелинейными связями.

Исследование динамических режимов и расчет энергетических характеристик совмещенных ЭМП энергии и их систем можно осуществить на основе обобщенных Лагранжевых уравнений в следующей векторно-матричной форме:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda}{\partial \dot{\alpha}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda}{\partial \alpha} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\alpha}} \end{bmatrix} = F, \tag{1}$$

где $\alpha = \alpha(q_f, q_s, \psi_f^*, \psi_s^*, x_f)$ — совмещенный вектор механических и электрофизических обобщенных координат; $F = F\left((e = -\frac{d\psi}{dt}, J^* = -\frac{dQ^*}{dt})\right)$

 $F_m = \frac{dP}{dt}$) — обобщенный вектор механических

и электрофизических сил; *D* — обобщенная диссипативная функция Релея (функция потерь или рассеивания).



Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема элементарного индуктивно-емкостного ЭМП энергии с активными магнитоэлектрическими материалами в функциональных элементах возбуждения:

a — при последовательном соединении элементов индуктивности и емкости в цепи приемника энергии; δ — при параллельном соединении элементов индуктивности и емкости

При этом функцию Лагранжа можно представить в следующей неаддитивной форме:

$$\lambda = \lambda_L + \lambda_C + \Delta \lambda_{LC}, \qquad (2)$$

где $\Delta \lambda_{LC}$ — член лагранжиана, учитывающий нелинейное электрофизическое взаимодействие между двумя подсистемами.

Необходимый лагранжиан может быть построен с помощью введения матрицы взаимодействия (взаимного влияния) между индуктивной и емкостной подсистемами в форме:

$$\hat{K}(q, \psi^*) = \begin{bmatrix} K_{LC}(S) & 0\\ 0 & K_{LC}(f) \end{bmatrix},$$
 (3)

где $K_{LC}(S)$ — выражает взаимное влияние между элементами общего приемника энергии; $K_{LC}(f)$ — определяет энергетическое состояние совмещенной системы возбуждения. В общем случае $K_{LC}(f)$ является непрерывным функционалом от электромагнитных теплофизических и механических характеристик активного материала:

$$K_{LC}(f) = K_{LC}(\beta(i_f),$$

$$\varepsilon(v_f^*), V_0, T), \qquad (4)$$

где $\beta(i_f)$, $\varepsilon(v_f^*)$ — магнитная и электрическая проницаемости; V_0 — объем; T — температура активного материала.

При последовательной связи эквивалентной индуктивности и эквивалентной емкости в цепи приемника энергии индуктивную подсистему (как источник напряжения) можно рассматривать как несущую с активно-емкостной нагрузкой, а при параллельной связи, наоборот, несущей подсистемой можно считать емкостную подсистему как источник тока с активно-индуктивной нагрузкой.

Исследование динамических и энергетических характеристик совмещенных ЭМП энергии можно осуществить, используя в уравнениях (1)—(4) следующие выражения:

• для последовательного соединения $C_S u L_S$

$$\lambda_{LC} = T_{LC} - \Pi_{C} T_{LC} = \frac{1}{2} i^{\tau} \hat{L}_{i} + i \hat{K}(q, \psi^{*}) V^{*\tau} \Pi_{C} = \frac{1}{2} V^{*\tau} \hat{C} V^{*}$$

$$(5)$$

• для параллельного соединения C_S и L_S

$$\lambda_{CL} = T_{CL} - \Pi_L T_{CL} = \frac{1}{2} V^{*\tau} \hat{C} V^* + V^* \hat{K}(q, \psi^*) i^{\tau} \Biggr\},$$
(6)
$$\Pi_L = \frac{1}{2} i^{\tau} \hat{L} i$$

где T_{LC} и T_{CL} — эффективные электрокинетические энергии; Π_C и Π_L — электрофизические потенциальные энергии; $i\hat{K}(q, \psi^*)V^{*\tau}$ и $V^*\hat{K}(q, \psi^*)i^{\tau}$ — обмененные энергии между двумя подсистемами; τ — транспонированная матрица; $i(i_f, i_s)$ — вектор токов; $V^*(V_f^*, V_s^*)$ — вектор напряжений; \hat{L} и \hat{C} — матрицы индуктивностей и емкостей,

$$\hat{L} = \begin{vmatrix} L_f & L_{fs} \\ L_s & L_{sf} \end{vmatrix},$$

$$\hat{C} = \begin{vmatrix} C_f & C_{fs} \\ C_s & C_{sf} \end{vmatrix}.$$
(7)

На базе уравнений (1)—(7) можно получить следующие уравнения электродинамики и механического движения:

• для последовательного соединения $C_s u L_s$

$$\frac{d\psi}{dt} + Ri + \hat{K}(q, \psi^*) \frac{dV^*}{dt} = V_S, \\
F_m = \frac{\partial T_{LC}}{\partial x},$$
(8)

где V_S — напряжение на внешней нагрузке; F_m — их обобщенные механические силы и обобщенные механические координаты;

• для параллельного соединения и $C_S u L_S$

$$\frac{dQ^{*}}{dt} + GV^{*} + K(q, \psi^{*})\frac{di}{dt} = i_{s},$$

$$F_{m} = \frac{\partial T_{CL}}{\partial x},$$
(9)

где *i*_s — ток во внешней нагрузке.

Заключение

Совместное решение уравнений (4)—(9) полностью определяет динамическое поведение обобщенной модели совмещенных ЭМП энергии в любых режимах взаимодействия их функциональных элементов. При этом для исследования совмещенных ЭМП энергии конкретной конструкции в данных уравнениях нужно учесть все конструкционные особенности их функциональных элементов.

Детальный анализ перспективного практического применения совмещенных ЭМП энергии в разных областях современной микросистемной техники (например, для конструирования сложнейших исполнительных механизмов в природоподобной робототехнике, для создания эффективных микроэлектродинамических ускорителей масс и т. д.) будет приведен в отдельной работе.

Список литературы

1. Копылов И. П., Гандилян С. В., Гандилян В. В. Некоторые вопросы обобщенного физико-математического моделирования электромеханических преобразователей энергии // Электротехника. 1998. № 9. С. 25—40.

2. Носов Г. В., Пустынников С. В. Индуктивно-емкостный генератор мощных импульсов тока для питания электрофизических установок в частотном режиме // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320. Вып. 4. С. 111—115.

3. Гандилян С. В. Некоторые вопросы обобщенного физико-математического моделирования микро- и наноэлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС) // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 8 (181). С. 15—32.

4. Караян Г. С., Гандилян С. В., Гандилян В. В. Современное состояние и перспективы развития микросистемной электромеханики // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 6. С. 370—380.

5. Смоленский Г. А., Чупис И. Е. Сегнетомагнетики // Успехи физических наук. 1982. Т. 137, Вып. 7. С. 415—448.

6. Пятаков А. П., Звездин А. К. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики // Успехи физических наук, 2012. Т. 182, № 1. С. 593—620.

7. **Фраерман А. А.** Магнитные состояния и транспортные свойства ферромагнитных наноструктур // Успехи физических наук. 2012. Т. 182, № 12. С. 1345—1351.

8. **Ter-Oganessian N. V.** Dielectric and Magnetic Properties of Magnetoelectric Delafossites // Ferroelectrics. 2012. Vol. 438, N. 1. P. 101–106.

9. **Pyatakov A. A., Zvezdin A. K., Vlasov A. M.** et al. Spin Structures and Domain Walls in Multiferroics Spin Structures and Magnetic Domain Walls in Multiferroics // Ferro-electrics. 2012. Vol. 438, N. 1. P. 79–88.

10. Stratulat S. M., Lu X., Morelli A. et al. Nucleationinduced self-assembly of multiferroic $BiFeO_2C_0F_{e2}O_4$ nanocomposites // NanoLatt. 2013. Vol. 13, N. 8. P. 3884–3889.

11. Караян Г. С., Гандилян С. В. Тенденции развития совмещенных магнитоэлектроиндукционных электромеханических преобразователей энергии // Вестник МЭИ. 2018. № 2. С. 65—71.

12. Гандилян С. В., Гандилян Д. В. Научно-технические основы применения наноструктурного материаловедения и наноэлектроники в системах электромеханических преобразователей энергии специального назначения // ЖТФ. 2019. Т. 89, Вып. 7. С. 975—983. [Gandilyan S. V., Gandilyan D. V. // Tech. Phys. 2007. Vol. 64, N. 7. P. 981—989]. **S. V. Gandilyan,** Ph. D., Associate Professor, e-mail: GandilyanSV@mgsu.ru, Moscow State University of Civil Engineering (Department of Physics and Aerodynamics), 129337, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: **Gandilyan Seyran V.,** Ph. D., Associate Professor, Moscow State University of Civil Engineering (Department of Physics and Aerodynamics), 129337, Moscow, Russian Federation e-mail: GandilyanSV@mgsu.ru

Some Issues of Modeling of Dynamic and Energy Characteristics of Combined Electro-magnetic Induction Microelectromechanical Energy Converters and their Systems

Received on February 09, 2020 Accepted on March 05, 2020

On the basic principles of binary conjugated electrophysics, a generalized Lagrange interpretation of energy conversion processes in microelectromechanical systems with electro-magneto-induction (inductive-capacitive) structural excitation elements is carried out. Some key questions of determining the dynamic and energy characteristics of microelectromechanical energy converters and their systems (MEMS) are considered, if their structural functional elements of excitation contain active nanostructured dual-purpose materials in which both magnetization and electric polarization are observed in the absence of external electromagnetic fields.

Keywords: dually conjugate electrophysics, dielectric, ferro-electromagnet, nanostructural materials science, electromagnetic induction micro- electromechanical energy converters

For citation:

Gandilyan S. V. Some Issues of Modeling of Dynamic and Energy Characteristics of Combined Electro-Magnetic Induction Microelectromechanical Energy Converters and their Systems, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 5, pp. 277–282.

DOI: 10.17587/nmst.22.277-282

References

1. **Kopylov I. P., Gandilyan S. V., Gandilyan V. V.** Nekotorye voprosy obobshchennogo fiziko-matematicheskogo modelirovaniya elektromekhanicheskikh preobrazovateley energii, *Elektrotekhnika*, 1998, vol. 9, pp. 25–40 (in Russian).

2. Nosov G. V., Pustynnikov S. V. Induktivno-emkostnyy generator moshchnykh impul'sov toka dlya pitaniya elektrofizicheskikh ustanovok v chastotnom rezhime, *Izvestiya Tomskogo poli-tekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 320, no. 4, pp. 111–115 (in Russian).

3. Gandilyan S. V. Nekotorye voprosy obobshchennogo fiziko-matematicheskogo modelirovaniya mikro- i nanoelektromekhanicheskikh sistem (MEMS i NEMS), *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2015, vol. 181, no. 8, pp. 15–32 (in Russian).

4. Karayan G. S., Gandilyan S. V., Gandilyan V. V. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya mikrosistemnoy elektromekhaniki, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 6, pp. 370–380 (in Russian).

5. **Smolenskiy G. A., Chupis I. E.** Segneto-magnetiki, *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1982, vol. 137, no. 7, pp. 415–448 (in Russian).

6. **Pyatkov A. P., Zvezdin A. K.** Magnito-elektricheskie materialy i mul'ti-ferroiki, *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2012, vol. 182, no. 1, pp. 593–620 (in Russian).

7. Fraerman A. A. Magnitnye sostoyaniya i transportnye svoystva ferromagnitnykh nanostruk-tur, *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2012, vol. 182, no. 12, pp. 1345–1351 (in Russian).

8. **Ter-Oganessian N. V.** Dielectric and Magnetic Properties of Magnetoelectric Delafossites, *Ferroelectrics*, 2012, vol. 438, no. 1, pp. 101–106.

9. Pyatakov A. A., Zvezdin A. K., Vlasov A. M., Sechin D. A., Calvet L. E. Spin Structures and Domain Walls in Multiferroics Spin Structures and Magnetic Domain Walls in Multiferroics, *Ferroelectrics*, 2012, vol. 438, no. 1, pp. 79–88.

10. Stratulat S. M., Lu X., Morelli A. Nucleation-induced self-assembly of multiferroic $BiFeO_2C_0F_{e2}O_4$ nano-composites, *NanoLatt*, 2013, vol. 13, no. 8, pp. 3884–3889.

11. **Karayan G. S., Gandilyan S. V.** Tendentsii razvitiya sovmeshchennykh magnito-elektroinduktsionnykh elektromekhanicheskikh preobrazovateley energii, *Vestnik MEI*, 2018, no. 2, pp. 65–71.

12. Gandilyan S. V., Gandilyan D. V. Nauchno-tekhnicheskie osnovy primeneniya nanostrukturnogo materialovedeniya i nanoelektroniki v sistemakh elektromekhanicheskikh preobrazovateley energii spetsial'nogo naznacheniya, *ZhTF*, 2019, vol. 89, no. 7, pp. 975–983. [Gandilyan S. V., Gandilyan D. V., *Tech. Phys.*, 2007, vol. 64, no. 7, pp. 981–989].

Элементы MHCT Micro-AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 681.586.773

DOI: 10.1757/nmst.22.283-292

А. В. Дайнеко, канд. физ.-мат. наук, зам. генерального директора по науке и инновациям, ddd@elpapiezo.ru, В. Г. Никифоров, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., nikiforov@elpapiezo.ru,
А. М. Храмцов, канд. физ.-мат. наук, директор НПК-3, npk_3@elpapiezo.ru,
Д. Ю. Шахворостов, канд. техн. наук, главный конструктор, shakhvorostov@inbox.ru,
Т. В. Щеголева, канд. физ.-мат. наук, технический директор, shogolevatv@mail.ru,
О. Ш. Мамин, директор по качеству, главный метролог, dk@elpapiezo.ru,
АО "Научно-исследовательский институт "Элпа" с опытным производством",
Москва, Зеленоград, 124460

АКТЮАТОРЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ДЛЯ СИСТЕМ НАНОПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Поступила в редакцию 22.03.2020

Приведены результаты исследований и разработки пьезоэлектрических многослойных актюаторов для систем нанопозиционирования на основе инновационных технологий литья тонкопленочных пьезоэлементов. По своим техническим характеристикам отечественные пьезоактюаторы соответствуют лучшим зарубежным аналогам, по эксплуатационным параметрам превосходят лучшие зарубежные аналоги.

Сформулированы основные требования к системам обратной связи, обеспечивающим контроль и управление параметрами пьезоактюаторов с нанометрическим разрешением.

Ключевые слова: системы нанопозиционирования, актюаторы с обратной связью, пьезоэлектрические актюаторы, многослойные пьезоэлектрические актюаторы

Современные системы нанопозиционирования созданы на основе применения пьезоэлектрических многослойных актюаторов, обеспечивающих перемещение до 100 мкм с точностью нанопозиционирования до 0,1 нм, линейностью не менее 0,1 % и быстродействием от миллисекунд до микросекунд [1-5].

Многослойные пьезоэлектрические актюаторы (далее — актюаторы) преобразуют электрические сигналы, такие как напряжение или заряды, в механические перемещения и/или усилия.

Диапазон рабочих частот актюаторов — от постоянного напряжения до частоты, приблизительно равной половине резонансной частоты механической системы. Существует практически линейная зависимость между входным электрическим напряжением и перемещением актюатора.

Быстродействие актюаторов составляет микросекунды, они обеспечивают высокий уровень ускорений до 10 000 g.

Актюаторы создают движение в субнанометровом диапазоне. Отсутствие движущихся деталей при контакте друг с другом обеспечивает высокие чувствительность и позиционирование, значения которых определяются возможностью электронного устройства, а не параметрами актюатора.

Актюаторы не создают магнитных полей, и при их работе не требуется электромагнитная защита.



Рис. 1. Базовая конструкция многослойного пьезоэлектрического актюатора:

1 — неполяризованный пассивный защитный пьезокерамический слой; 2 — пъезокерамические поляризованные слои; 3 — внутренние электроды; 4 — внешние электроды для токоподвода

В статическом режиме работы, даже удерживая тяжелый груз в течение длительного периода времени, актюатор не потребляет энергию при постоянном напряжении. Актюатор ведет себя как электрический конденсатор, в состоянии покоя теплота не выделяется.

Твердотельная конструкция актюаторов обеспечивает их надежную работу в сверхвысоком вакууме и при криогенных температурах.

Актюатор не имеет движущихся деталей и обладает повышенной надежностью на износ. Срок службы актюаторов в номинальном режиме работы составляет несколько миллиардов циклов.

Многослойные пьезоэлектрические актюаторы представляют собой многослойную конструкцию, состоящую из чередующихся слоев (толщиной от 30 до 120 мкм) из пьезокерамического материала и внутренних электродов (толщиной до 3...4 мкм), где в качестве материала используется сплав серебро-палладий с незначительными добавками пьезокерамического материала, обеспечивающего повышенную адгезию силу сцепления металлического сплава с керамикой.

Габаритные размеры: сечение и высота актюатора определяются технологическими возможностями оборудования и, как правило, их сечение варьируется в пределах от 2×2 мм до 20×20 мм, а максимальная высота для моноблочной конструкции составляет около 100 мм.

Базовая конструкция многослойного пьезоэлектрического актюатора приведена на рис. 1.

На боковые грани актюатора нанесены внешние электроды — воженное серебро (толщина слоя до 4...6 мкм), к которому с помощью пайки провода осуществляется электроподвод напряжения.

Основные электрофизические параметры и методики измерения

Не существует международных стандартов по измерению и нормированию основных параметров многослойных пьезоэлектрических актюаторов. У разных производителей эти значения могут отличаться в зависимости от методов определения, условий измерений.

Общепринято нормируются следующие основные параметры многослойных пьезоэлектрических актюаторов:

 ΔZ , мкм, — номинальное перемещение — амплитуда перемещения при номинальном значении напряжения по постоянному току;

F, H, — развиваемое усилие (при максимальном значении напряжения постоянного тока) максимальная сила, генерируемая пьезоактюатором, заблокированным путем жесткого неподатливого удержания (нулевое перемещение).

Значения развиваемого усилия разные производители измеряют различными методами прямые измерения или расчетные соотношения:

$$F = \frac{d_{33}S}{S_{33}^E\Delta} U[\mathrm{H}],$$

 d_{33} — пьезомодуль пьезокерамики, м/В; S — площадь сечения пьезоактюатора, м²; S_{33}^E — упругая податливость пьезокерамики, $M^2/H;$

 Δ — толщина слоя пьезоэлемента, м;

U — максимальное напряжение постоянного тока, В;

 C_0 — электрическая емкость [Φ] определяет динамический режим работы и требования к мощности источника питания. По отношению к источнику питания пьезоактюатор можно рассматривать как электрическую реактивную емкостную нагрузку;

 f_p , Гц, — резонансная частота — обычно приводят значения частоты ненагруженного пьезоактюатора, жестко закрепленного одним концом.

Контроль электрофизических параметров пьезоэлектрических актюаторов проводили на рабочем месте для выполнения измерений. Структурная схема рабочего места проведения измерений дана на рис. 2.

Погрешность измерений при проверке амплитуды перемещений — не более ± 1 мкм.

Максимальную амплитуду перемещения Z_m определяют при максимальном напряжении +120 В.

Погрешность источника напряжения — в пределах ± 5 В.

Контроль статической емкости осуществляют с помощью измерителя иммитанса Е7-20. Под-

ключают клеммы измерителя к измерительным выводам пьезоактюатора и считывают значение емкости с табло измерителя.

Максимальное развиваемое усилие пьезоактюаторов определяют с помощью приспособления ПР.9625, при подключении по структурной схеме измерения, приведенной на рис. 2.

Измерения проводят в следующей последовательности.

Пьезоактюатор устанавливают в приспособление ПР.9625 и регулировочным винтом осуществляют поджатие пьезоактюатора с усилием 50 Н.

Значения усилия определяют динамометром электронным АЦДС-2И-1.

Электрические выводы пьезоактюатора подключают к источнику напряжения GPR-30H10D.

На включенном источнике напряжения устанавливают напряжение 120 В.

Проводят измерение усилия в точках: 200, 600, 1000 Н.

Определяют максимальное развиваемое усилие по показаниям динамометра электронного АЦДС-2И-1.

Погрешность измерений ±1 %.



Рис. 2. Схема рабочего места для проведения измерений электрических параметров актюатора:

1 — источник питания GPR-30H10D; 2 — пульт для измерения пьезоактюаторов THA.9624; 3 — индуктивная измерительная система М-200-00 (держатель ПР.9629, индикатор БИН-24 № 1603, измеритель М021 № 1611, стойка С-1 ГОСТ 10197); 4 — актюатор; 5 — измеритель иммитанса Е7-20; 6 — приспособление для измерения развиваемого усилия ПР.9625; 7 — электронный динамометр АЦДС-2И-1; 8 — анализатор цепей Agilent E5061B

> Резонансную частоту пьезоактюатора определяют в соответствии с руководством по эксплуатации анализатора цепей Agilent E5061В при включении пьезоактюатора в соответствии со схемой соединения приборов при измерении электрических параметров в нормальных условиях (рис. 2).

> Основная причина нестабильности параметров пьезоэлектрических пьезоактюаторов связана только с одним параметром — управлением напряжением и, соответственно, с точностью его установки и поддержания, которые обеспечивают стабильность и воспроизводимость параметров.

Причина нестабильности пьезоактюаторов связана с поведением пьезоматериала в электрическом поле.

При подаче на поляризованный пьезоэлемент электрического поля происходит изменение его размеров за счет пьезоэффекта. Эти изменения носят макроскопический характер, хотя и малы по своим размерам. На микроуровне этому явлению соответствует изменение параметров решетки каждого отдельного кристалла, т. е. растяжению и сжатию каждого элементар-

ного объема, начиная с ячейки, за счет соответствующего смещения атомов. На более высоком уровне кристаллы объединены в зоны (объемы), в которых поляризация имеет одно направление — домены. В зерне керамики одновременно присутствуют домены разной ориентации, разделенные между собой границами — 90- и 180-градусными, т. е. направления поляризации смежных доменов направлены под 90° или 180° друг к другу. Само зерно при этом имеет поляризацию в том направлении, в котором поляризовано большее по объему число доменов, т. е. это уже интегральная характеристика. Вследствие наличия доменов разной ориентации те домены, направление поляризации которых совпадает с направлением поля, начинают расти, а те, у которых не совпадает, уменьшаться в размерах, что реализуется путем движения границ раздела между доменами. Интегрально это приводит к изменению поляризации каждого зерна. Таким образом, если мы начинаем прикладывать напряжение к образцу в направлении поляризации, будет увеличиваться не только размер образца в этом направлении, но и сама поляризация и в итоге мы будем наблюдать, что рост размера идет быстрее, чем по линейному закону, т. е. появляется нелинейный эффект второго порядка. Аналогично, при снижении напряжения от ранее установленного значения уменьшение размеров будет идти медленнее, чем в линейном случае. В результате деформация поляризованного пьезоэлемента будет описываться петлей гистерезиса, которая определяет предельные значения минимального разрешения.

В процессе испытаний многослойных актюаторов на наработку на отказ было выявлено, что изменение электрофизических параметров составляет ± 10 %, а основной причиной отказа является разрушение. Наблюдаются два вида отказа:

— отказ на этапе изготовления;

— отказ или износ при длительной эксплуатации.

Основные причины выхода из строя актюаторов на этапе изготовления следующие:

- отслоение внутренних электродов от керамики;
- образование и рост трещин в процессе поляризации;
- возникновение трещин на краях внутренних электродов;

• механические напряжения, возникающие на границе заполяризованного и незаполяризованного материалов.

В процессе эксплуатации, помимо перечисленных выше причин, возникают внутренние механические напряжения и неоднородные электрические поля, при этом значение напряжения растяжения вокруг краев электродов может достигнуть 0,1 ГПа, что близко к прочности керамики на разрыв.

Исследование надежности от конструктивнотехнологических решений показали, что качество изделий в первую очередь зависит от качества изготовления пьезокерамического материала:

— размера зерна — оптимальное значение 1...2 мкм;

— пористости и плотности материала (плотность не менее $7,5 \text{ г/см}^3$);

— температуры спекания — оптимальное значение 950...1050 °C;

— оптимизации режима поляризации — 2 кВ/мм в течение 60 мин, желательно в ванне с силиконовым маслом.

Надежность актюаторов зависит от конструкции внутренних электродов. Конфигурация должна обеспечивать равномерное распределение напряженности поля, и тем самым исключается переменный размер. Для многослойных актюаторов выбрана встречно-штырьевая конфигурация, которая обеспечивает требуемую надежность и высокую технологичность изготовления. Электрод должен иметь минимальную толщину и без зазора прилегать к керамике. Зазор или воздушная прослойка (с низкой диэлектрической проницаемостью) между электродом и керамикой (высокой диэлектрической проницаемостью) приводит к перераспределению и изменению прилагаемого напряжения, что может вызвать локальный внутренний пробой.

Достигнутая минимальная толщина электрода — сплав Ag/Pd (70/30) — 3 мкм.

Максимальное значение напряженности электрического поля для пьезокерамического материала, обеспечивающего его надежную работу, составляет $E_{\rm np} = 2$ кВ/мм (международные стандарты на пьезокерамику — ЕМ 503М, IEC 60302, IEC 122-1 (2002)). Для толщины слоя 50 мкм значение номинального напряжения +100 В (E = 2 кВ/мм).

Установлено, что минимальная толщина слоя многослойного актюатора составляет не менее

50 мкм, при этом значение миграции серебра в толщу керамики не оказывает существенного влияния на срок службы.

Режим начальных отказов является результатом дефектов производственного процесса. В данном случае наработка на отказ определяется законом распределения Вейсбула (отказ невосстанавливаемых приборов). Закон распределения описывается в двухпараметрической форме:

$$F(t) = 1 - \exp(t/\alpha)\beta.$$

Оценке подлежат два параметра:

 α — параметр масштаба; β — параметр формы.

При двойном интегрировании получаем линейную зависимость вида:

$$\beta \ln t - \beta \ln \alpha$$
.

Графическая линеаризация функции распределения Вейсбула путем введения логарифмической шкалы аргумента и двойной логарифмической шкалы функции позволяет оценить надежность пьезоактюатора.

Проведенные в АО "НИИ "Элпа" в течение 3 лет испытания пьезоактюаторов АПМ-2-12 на долговечность при температуре окружающей среды +85 °C и напряжении постоянного тока +100 В с частотой 50 Гц показали, что в течение 20 000 ч электрофизические параметры перемещения, статическая емкость, сопротивление изоляции изменяют свои значения на 3...5 %. В пьезоактюаторах АПМ-2-12 использовались пьезоэлементы из материала ЦТС-46 с размерами $6 \times 6 \times 2,7$ мм (толщина слоя 50 мкм).

Сравнительный анализ разрабатываемых изделий с аналогами

За рубежом в настоящее время разработкой и производством многослойных пьезоэлектрических актюаторов и пьезоэлектрических платформ линейного перемещения с нанометрической воспроизводимостью занимаются фирмы Physik Instrymente (Германия), Piezosystem Jena (Германия), New Port (США), Electronic Ceramic Device (Китай), Piezomechnik GmbH (Германия), Cedrat Technologies (Франция).

В системах нанопозиционирования используют, как правило, многослойные пьезоэлектрические актюаторы сечением 5 × 5 мм (толщина слоя 50...100 мкм).

В табл. 1 приведены основные параметры многослойных пьезоэлектрических актюаторов сечением 5 × 5 мм ведущих зарубежных фирм.

В отличие от технологии сборки пьезоэлектрических актюаторов в АО "НИИ "Элпа" зарубежные изделия спекают в пьезокерамические блоки длиной 9...20 мм.

Основное отличие конструкции зарубежных пьезоактюаторов от конструкции АО "НИИ "Элпа" состоит в том, что при сборке с помощью клеевого соединения пьезокерамических элементов используется различная базовая конструкция пьезоэлемента: в зарубежных пьезоактюаторах используют пьезоэлементы с размерами $5 \times 5 \times (9...18)$ мм, в АО "НИИ "Элпа" — пьезоэлементы с размерами $5 \times 5 \times 2,6$ мм.

В настоящее время АО "НИИ "Элпа" осуществляет серийный выпуск типоряда пьезоактюаторов на основе пьезоэлемента 6 × 6 × 2,6 мм, который обеспечивает параметры, соответствующие параметрам лучших зарубежных аналогов.

В табл. 2 приведены основные эксплуатационные параметры разработанных и выпускаемых АО "НИИ "Элпа" пьезоэлектрических актюаторов для систем нанопозиционирования, которые соответствуют лучшим зарубежным аналогам.

Однако надежность пьезоактюаторов, собранных из пьезокерамических элементов 5 × 5 × × 2,6 мм, выше, так как с увеличением толщины растет вероятность отказа за счет растрескивания. Кроме того, предварительная электро- и термотренировка пьезокерамических элементов позволяет определить дефектность до сборки пьезоактюатора.

Эксплуатационные параметры пьезоактюаторов

Стойкость к внешним воздействующим факторам. Пьезоактюаторы стойки к воздействию механических и климатических факторов в соответствии с данными, приведенными в табл. 3.

Надежность:

— гамма-процентная наработка до отказа T_{γ} при $\gamma = 95 \%$ в типовом режиме эксплуатации при температуре окружающей среды 85 °С не менее 10 000 ч в пределах срока службы T_{cn} 15 лет;

— гамма-процентный срок $T_{C\gamma}$ при $\gamma = 95 \%$ при хранении в упаковке изготовителя в условиях отапливаемых хранилищ не менее 15 лет. *Указания по эксплуатации*. При использовании, монтаже и эксплуатации пьезоактюаторов следует строго соблюдать порядок включения.

Для обеспечения нормальной работы пьезоактюатор должен быть надежно соединен с твердой поверхностью. Основным методом крепления является приклеивание. Приклеивание рекомендуется проводить эпоксидными или акрилатными клеями. Рекомендуется использовать эпоксидный клей ЭД-20 ЖКГД.25101.00018.

После монтажа поверхность пьезоактюатора должна быть покрыта двумя слоями лака УР-231 (ТУ-6-21-14—90).

Правильная установка пьезоактюаторов в механической системе должна обеспечить передачу только осевой составляющей силы и исключить изгибающие, наклоняющие или сдвигающие силы. Пьезоактюатор должен быть установлен только на свои концевые стороны; фиксирование по периметру может повредить пьезокерамические элементы или электроды. При установке пьезоактюатора в конструктивное гнездо между боковыми поверхностями пьезоактюатора и конструктивными стенками рекомендуется прокладывать прослойку из фторопластовой ленты (типа фторопласт-4 ГОСТ 24222).

При случайной подаче на положительный электрод отрицательного напряжения более 25 В пьезоактюатор выходит из строя. Выводы пьезоактюатора рекомендуется шунтировать диодом, включенным во встречном направлении.

Резонансная частота пьезоактюатора приведена при креплении его конца к жесткому основанию.

Таблица 1

№ п/п	Тип, наименование актюатора	Размер пьезоблока,	Номинальное перемещение,	Максимальное перемещение, мкм напряжении) H ±10%		Емкость, мкФ 10%	Резонансная частота, Гц +20%		
Physik Instrymente (Германия)									
			U = +100 B	U = +120 B	U = +120 B				
1	P885.11	$5 \times 5 \times 9$	$6,5 \pm 20\%$	$68 \pm 20\%$	800	0,6	135		
2	P885.31	$5 \times 5 \times 13,5$	$11 \pm 20\%$	$13 \pm 20\%$	870	1,1	90		
3	P885.51	$5 \times 5 \times 18$	$15 \pm 10\%$	$18 \pm 10\%$	900	1,5	70		
4	P885.91	$5 \times 5 \times 36$	$32 \pm 10\%$	$38 \pm 10\%$	950	3,1	40		
			Piezosys	stem Jena (Германи	(я)				
			U = +100 B	—	U = +120 B				
1	P201-40	$5 \times 5 \times 9$	$9 \pm 10\%$	—	850	0,8	—		
2	P202-40	$5 \times 5 \times 20$	$20\pm10\%$	—	850	1,8	—		
3	P203-40	$5 \times 5 \times 30$	$30 \pm 10\%$	—	850	2,4	—		
4	P205-40	$5 \times 5 \times 41$	$40\pm10\%$	—	850	3,6	—		
5	P206-40	$5 \times 5 \times 61$	$60 \pm 10\%$	_	850	5,4	—		
			Electronic	Ceramic Device (K	итай)				
				U = +200 B	U = +200 B				
1	WTYD505010	$5 \times 5 \times 10$	—	$10 \pm 20\%$	640	0,45	—		
2	WTYD505020	$5 \times 5 \times 20$	_	$20\pm10\%$	640	0,9	_		
3	WTYD505030	$5 \times 5 \times 30$	_	$30 \pm 10\%$ 640		1,35	—		
4	WTYD505040	$5 \times 5 \times 40$	—	$40 \pm 10\%$ 640		1,8	—		
			NEC	ТОКІN (Япония)					
			U = +100 B	U = +150 B	U = +150 B				
1	AE0505D08	$5 \times 5 \times 10$	$9 \pm 1,5$	11 ± 2	850	0,75	138		
2	AE0505D16	$5 \times 5 \times 20$	$17 \pm 2,0$	28 ± 4	850	1,4	69		
3	AE0505D44	$5 \times 5 \times 40$	$42 \pm 6,6$	60 ± 8	850	3,4	34		
			Piezomech	nnik GmbH (Герма	ния)				
			U = +100 B	U = +120 B	U = +140 B				
1	PSt150(5×5)7	$5 \times 5 \times 9$	$9 \pm 10\%$	$13 \pm 20\%$	1600	0,8	100		
2	PSt150(5×5)20	$5 \times 5 \times 18$	$18 \pm 10\%$	$26 \pm 10\%$	1600	1,1	50		
			Ν	ew Port (США)					
			U = +130 B	U = +150 B					
1	NPA25D	$\emptyset 12 \times 44$	$25 \pm 10\%$	_	1000	2.5	12 000		
2	NPA50D	$\emptyset 12 \times 71$	$50 \pm 10\%$	_	1000	5.4	8000		
3	NPA100D	$\emptyset 12 \times 108$	$100 \pm 10\%$	_	1000	9.0	3000		
						- , -			

Перемещение торца пьезоактюатора при изменении напряжения характеризуется петлей гистерезиса, составляющей ±15 % от максимального значения перемещения.

Пьезоактюаторы имеют низкое значение прочности на растяжение, которое может привести к его расслоению и выходу из строя. Пьезоактюаторы рекомендуется использовать в условиях предварительного поджатия силой не менее 350 H.

Пьезоактюаторы в электрической схеме представляют емкостную нагрузку и имеют ток утечки не более 5 мкА, и, следовательно, в квазистатическом режиме его тепловые потери незначительны. При изменении напряжения от 20 до 120 В наблюдается практически линейная зависимость амплитуды перемещения пьезоактюаторов от напряжения. Изменение перемещения во времени воспроизводит изменение напряжения с запаздыванием не более 100 мкс.

В процессе любой операции рекомендуется закорачивать пьезоактюаторы, так как любые механические нагрузки приводят к образованию на их электродах значительного заряда.

Использование пьезоактюаторов в динамическом режиме со скоростью нарастания (спада) фронтов более 2 · 10⁴ В/с приводит к снижению их надежности.

Таблица 2

Основные	параметры	актюаторов	пьезоэлект	рических	многослойных	для	систем	нанопозициони	рования
0.00000000	mapanerpor	aminoaropos	mbeooonen			~~~~~		manonooniquoni	Population

Поромотр	Ед. изм.	Значение								
параметр		АПМ-1-3	АПМ-1-7	АПМ-1-12	АПМ-1-3М	АПМ-1-7М	АПМ-1-12М	АПМ-2-15	АПМ-2-25	
Габаритные	$_{\rm MM}$ $ imes$ $_{\rm MM}$	$5 \times 5 \times 9$	$5 \times 5 \times 18$	$5 \times 5 \times 37$	$5 \times 5 \times 9$	$5 \times 5 \times 18$	$5 \times 5 \times 37$	$6 \times 6 \times 40$	6 × 6 × 75	
Максимальное перемещение	МКМ	8	20	38	11	26	50	40	70	
(при напряже- нии постоянно- го тока +120 В), ± 15% Развиваемое усилие (при напряжении постоянного тока +120 В),	МКМ	1000	1000	1000	1100	1100	1100	1200	1200	
не менее Электрическая емкость (+20 %)	мкФ	1,0	1,6	3,6	1,6	3,6	7,5	7,0	15,0	
Резонансная частота, (± 20 %)	кГц	130	70	40	130	70	40	40	20	
Диапазон управ- ляющих напря- жений постоян- ного тока	В		1		-2	0÷+120			1	

Таблица 3

Внешний воздействующий фактор	Внешний воздействующий фактор Характеристики фактора, единица измерения	
	Механические факторы	
Механический удар одиночного	— пиковое ускорение M/c^2 (g);	150 (15)
действия	 длительность действия ударного ускорения, мс 	
Механический удар многократного	— пиковое ускорение M/c^2 (g);	100 (10)
действия	— длительность действия ударного ускорения, мс	
	Климатические факторы	
Повышенная температура среды	— максимальное значение при эксплуатации, °С;	85
	— максимальное значение при транспортировании и хранении, °С	
Пониженная температура среды	— минимальное значение при эксплуатации, °С;	минус 40
	— минимальное значение при транспортировании и хранении, °С	минус 60
Изменение температуры среды	Скорость изменения температуры не менее 1 °С/мин	от 85 до минус 60
Повышенная относительная влажность	При температуре 25 °C, %	98,0

Факторы стойкости пьезоактюаторов



Рис. 3. Схема управления с разомкнутой цепью обратной связи



Рис. 4. Схема управления с замкнутой цепью обратной связи

Пьезоактюаторы обладают стойкостью к радиационному воздействию до уровня 60 МэВ · см²/мг.

Основной недостаток многослойных пьезоэлектрических актюаторов связан с параметрами пьезокерамики: высокая нелинейность и гистерезис, крип. Однако эти недостатки можно компенсировать при их включении в системы питания и управления, обеспечивающие активную стабилизацию с помощью обратной связи. Обратная связь — управление с помощью программируемого сервоконтроллера с компенсацией внешних воздействующих факторов, нелинейности и гистерезиса. Аппаратурное разрешение систем обратной связи актюаторов осуществляется пропорционально-интегро-дифференциальным (ПИД) управлением с процессом цифровой обработки сигнала с корректировкой управляющего сигнала в зависимости от отклонения реального перемещения от заданного.

ПИД-регулятор осуществляет регулировку колебаний вокруг заданного значения с разрешением, определенным шагом квантования, и его минимальное значение ограничено шумами электронной аппаратуры.

Для определения позиции актюатора с заданной точностью используется определенная метрология, в которой применяются бесконтактные датчики. Наивысшее разрешение достигается с емкостными датчиками (~0,1 нм).

Схемы управления пьезоактюаторами

Схемы управления пьезоактюаторами делятся на схемы с разомкнутой цепью обратной связи (рис. 3) и схемы с замкнутой цепью обратной связи (рис. 4).

В схемах с разомкнутой обратной связью применяется вычислительный метод компенсации гистерезиса пьезоактюатора, основанный на различных математических моделях: Прейсаха (Preisach), Прандтла—Ильшинского [6, 7], Максвелла [8] и схемы контроля его заряда. Недостатком вычислительных методов является сложность прогнозирования перемещения пьезоактюатора при воздейст-

вии внешних факторов, поведения петли гистерезиса во времени, сложность технической реализации схемы управления по заряду вследствие влияния помех.

В настоящее время, как правило, для пьезоэлектрических актюаторов и систем на их основе с нанометрической точностью используются схемы управления с замкнутой цепью обратной связи с соответствующим программным обеспечением.

В пьезоактюаторах с обратной связью датчик расположен на поверхности пьезоэлектрического блока, общая схема системы управления приведена на рис. 5.

Система управления предназначена для обеспечения согласованного функционирования актюаторов по алгоритму, определяемому спецификой решаемой задачи.

Архитектура электронного блока (сервоконтроллера) позволяет наращивать число управляемых актюаторов путем подключения к управляющему компьютеру дополнительного числа сервоконтроллеров.

Адаптация системы управления для нового типа задач сводится к замене программного обеспечения и не требует аппаратной модернизации системы.

Блок электронного управления выполнен в виде ячейки, устанавливаемой в стандартный крейт либо в собственный корпус.



Рис. 5. Общая схема системы управления актюатора с обратной связью

Блок электронного управления состоит из аналоговой и цифровой частей. Аналоговая часть состоит из модулей аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования, которые, помимо непосредственно преобразования, осуществляют фильтрацию и усиление сигналов. Цифровая часть представляет собой модуль цифровой обработки и управления, построенный на основе ПЛИС.

Особенностью пьезокерамического привода является то, что при большом изменении напряжения, приложенного к пьезоактюатору, фактическое значение движения может отличаться от ожидаемого вследствие большого числа внешних параметров, воздействующих на актюатор.

Ошибка установки положения пьезопривода может составить от 10 до 15 % его рабочего диапазона. Данная проблема решается путем объединения пьезопривода с датчиком положения, обладающим высокой точностью и линейностью.

Для обеспечения высокой точности и разрешения в контроллере применяется 24-битный АЦП.

Задачей блока электронного управления является постоянное сравнение фактического положения актюатора с заданным, определяемым значением управляющего сигнала. В случае различия заданного и фактического положений контроллер немедленно его компенсирует подстройкой управляющего сигнала. Таким образом достигается точность установки пьезоактюатора, равная ~0,1 % рабочего диапазона. Программное обеспечение функционирует на управляющем компьютере и обеспечивает функционал системы в целом.

Управляющее программное обеспечение состоит из следующих основных модулей:

 высокоточная модель движения пьезоуправляемой платформы;

- модуль преобразования координат;
- модуль выработки управляющих команд;
- модуль управления контроллером (драйвер);
- графический интерфейс;

 функциональный контроль сервоконтроллера.

Заключение

На базе многослойных пьезоактюаторов разрабатывают и выпускают за рубежом пьезоплатформы линейных и угловых перемещений.

Пьезоплатформы обеспечивают высокие линейность нанопозиционирования и разрешение, обладают малым временем отклика (от миллисекунд до микросекунд).

Список литературы

1. Шанин О. И. Адаптивные оптические системы корреляции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. Техносфера, Москва, 2013. 296 с.

2. **PI-**MOTION | POSITIONING. URL: https:// www.physikinstrumente.com

3. **Piezo** Systems for Actuating. URL: https:// www.piezosystem.com/

4. **Electromagnetic,** Electric, and Thermal Analysis URL: https://www.cedrat.com

5. **Newport** — Photonics Solutions. URL: https:// www.newport.com/

6. Бардин В. А., Васильев В. А. Актюаторы нано- и мироперемещений для систем управления, контроля и безопасности // Современная техника и технологии. 2014. № 2. URL: http://technology.snauka.ru/2014/02/3057 7. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПБ ГУ ИТМО, 2011. 131 с.

8. **Mayergoyz I. D.** Mathematical model of hysteresis. N.Y. Springer. Vetlab New York Inc., 1991.

A. V. Dayneko, Ph. D., Deputy CEO of Science and Innovation, ddd@elpapiezo.ru,

V. G. Nikiphorov, Ph. D., Leading Researcher, nikiforov@elpapiezo.ru;

A. M. Khramtsov, Ph. D., Director NPK-3 npk_3@elpapiezo.ru;

D. Yu. Shakhvorostov, Ph. D., Chief Designer, shakhvorostov@inbox.ru;

T. V. Shogoleva, Ph. D., Technical Director, shogolevatv@mail.ru;

O. Sh. Mamin, Quality Director dk@elpapiezo.ru

Elpa Research Institute and Pilot Line, JSC, Moscow, Zelenograd, Russian Federation

Corresponding author:

Dayneko Andrey V., Ph. D., Deputy CEO of Science and Innovation, Elpa Research Institute and Pilot Line, JSC, Moscow, Zelenograd, 124460, Russian Federation, E-mail: ddd@elpapiezo.ru

Piezoelectric Multilayer Actuators for Nanopositioning Systems

Received on March 22, 2020 Accepted on March 25, 2020

The article presents the results of research and development of piezoelectric multilayer actuators for nanoposition systems based on innovative technologies for casting thin-film piezoelectric elements. According to their technical characteristics, domestic piezoelectric actuators correspond to the best foreign analogues, surpass the best foreign analogues in operational parameters.

The basic requirements for feedback systems are formulated that provide monitoring and control of the parameters of piezoelectric actuators with nanometric resolution.

Keywords: nanoposition systems, feedback actuators, piezoelectric actuators, multilayer piezoelectric actuators

For citation:

Dayneko A. V., Nikiphorov V. G., Khramtsov A. M., Shakhvorostov D. Yu., Shogoleva T. V., Mamin O. Sh. Piezoelectric Multilayer Actuators for Nanopositioning Systems, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 5, pp. 283–292.

DOI: 10.17587/nmst.22.283-292

References

1. **Shanin O.** Adaptivnie opticheskie systemi korrelyacii naklonov. Rezonansnaya adaptivnaya optika. Moscow, Tehnosphera, 2013, 296 p. (in Russian).

2. **PI-MOTION** | POSITIONING, available at: https://www.physikinstrumente.com

3. **Piezo** Systems for Actuating, available at: https://www.piezosystem.com/

4. **Electromagnetic**, Electric, and Thermal Analysis, available at: https://www.cedrat.com

5. **Newport** — Photonics Solutions, available at: https://www.newport.com/

6. **Bardin V. A., Vasil'ev V. A.** Aktyuatory nano- i miroperemeshchenij dlya sistem upravleniya, kontrolya i bezopasnosti, *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii*, 2014, no. 2, available at: http://technology.snauka.ru/2014/02/3057 (in Russian).

7. Bobcov A. A., Bojkov V. I., Bystrov S. V., Grigor'ev V. V. Ispolnitel'nye ustrojstva i sistemy dlya mikroperemeshchenij. SPB GU ITMO, 2011, 131 p. (in Russian).

8. **Mayergoyz I. D.** *Mathematical model of hysteresis.* N.Y. Springer. Vetlab New York Inc., 1991.

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

Технический редактор Т. А. Шацкая. Корректор Е. В. Комиссарова.

Сдано в набор 25.03.2020. Подписано в печать 24.04.2020. Формат 60×88 1/8. Заказ МС520. Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Представляем книгу^{*} «ОСНОВЫ БЕТА-ВОЛЬТАИКИ»

(авторы Л.А. Цветков, А.А. Пустовалов, Н.Н. Баранов, А.А. Мандругин)

Издание является первой своевременной попыткой представить в едином источнике разнородные сведения из перечисленных областей, показать сложность и взаимосвязь отдельных сторон проблемы создания серийной батареи для многочисленных применений. Книга предназначена для научных работников и инженеров-исследователей, будет полезна преподавателям, студентам и аспирантам, интересующимся современными инновационными разработками в области прямого преобразования видов энергии.

Бета-вольтаическая батарея – это устройство, в котором кинетическая энергия быстрых электронов, рождающихся при бета-распаде, преобразуется в электрическую. В зависимости от того, какой радионуклид использован в качестве первичного источника энергии, такая батарея может быть компактной, суперэнергоёмкой без саморазряда, с непревзойдёнными надёжностью и независимостью от окружающей среды.

Бета-вольтаическая батарея является прорывной научнотехнической разработкой и в последние годы интенсивно разрабатывается. Она рождается на стыке нескольких узкоспециализированных областей знания:

- ядерная физика и ядерные реакторы,
- химия и радиохимия,
- обогащение стабильных и радиоактивных изотопов,
- центрифуги и лазеры,
- полупроводники и микроэлектроника,
- нанотехнологии.

основы

БЕТА-ВОЛЬТАИКИ

* Книга издательства «РадиоСофт»

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» выпускает научно-технические журналы



Междисциплинарный теоретический и прикладной научно-технический журнал

НАНО-и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано- и микросистем в различные области науки, технологии и производства.

> Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 79493



Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 79963

Научно-практический и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ жизнедеятельности

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности. Ежемесячный теоретический и прикладной научнотехнический журнал ИНФОРМАЦИОННЫЕ

ТЕХНОЛОГИИ В журнале освещаются современ-

ное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ



Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 72656



Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 79492 Ежемесячный теоретический и прикладной научно-технический журнал

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

В журнале освещаются достижения в области мехатроники, интегрирующей механику, электронику, автоматику и информатику в целях совершенствования технологий производства и создания техники новых поколений. Рассматриваются актуальные проблемы теории и практики автомати ческого и автоматизированного управления техническими объектами и технологическими процессами в промышленности, энергетике и на транспорте.

Теоретический и прикладной научно-технический журнал ПРОГРАММНАЯ

ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях челове ческой деятельности.



Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 22765

241 – 292. Индекс: 79493 (Объединенный каталог «Пресса России») 5. Ÿ ISSN 1813-8586. Нано- и микросистемная техника. 2020. Том 22.

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ". Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10. E-mail: antonov@novtex.ru