

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.8.1>

УДК: 621.3.049.779; 537.226.86; 681.7.068

НА ПУТИ К СОЗДАНИЮ УПРАВЛЯЕМЫХ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ (ОПТО)ВОЛОКОННЫХ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ И КОМПОЗИТОВ

**П.Л. Александров ¹, Е.Л. Бурьянская ^{2,3}, О.В. Градов ⁴, А.Л. Иорданский ⁴,
И.А. Маклакова ^{4,5}, А.А. Ольхов ^{4,5}, А.В. Ратновская ⁵, С.Н. Холуйская ⁴**

**¹ Институт Высшей Нервной Деятельности и Нейрофизиологии РАН,
117485, Москва, ул. Бутлерова, 5А**

**² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5/1**

**³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
119526, Москва, Ленинский проспект, 1/2, корп. 1**

**⁴ Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН,
119991, Москва, ул. Косыгина, 4**

**⁵ Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН,
119334, Москва, ул. Косыгина, 4**

Статья поступила в редакцию 18 апреля 2025 г.

Аннотация. Поставлена проблема взаимодействия микроэлектромеханических систем и структур с электронными и ионными пучками, актуализируемая для задач криовакуумной и космической электроники и управления космическими телескопами во вводной части статьи, где продемонстрирована необходимость моделирования данного воздействия в наземном эксперименте. Предлагается и реализуется методика моделирования воздействия пучков заряженных частиц на полимерные сегнетоэлектрические и пьезоэлектрические конструкции типа взаимодействующих волокон / «нечетких нейроморфных коннектомов» на базе инструментов времяразрешенной электронной микроскопии с анализом данных в реальном времени, вплоть до стробоскопической электронной микроскопии.

В частности, используется двумерное преобразование Фурье и вычисление на его основе интегральных пространственных характеристик в реальном времени, анализ межкадровых корреляций с программируемым временным интервалом, комплексные вейвлеты. В ходе экспериментов исходно показывается динамика пьезоэлектрических волокон для создания микроэлектромеханических систем, детектируемая по изменению двумерных Фурье-спектров волоконных структур во времени под действием электронного пучка. Далее показывается динамика волоконных конструкций и сетей, топология которых меняется под действием электронного пучка. Данные цейтраферной регистрации доказывают, что в ряде случаев подобные конструкции могут работать как приводные (управляющие) электромеханические элементы, упругие элементы (пружины), замыкатели или запирающие (блокирующие) элементы. Также демонстрируется механический излом микроволокна. Указывается на возможность сопряжения волокон разной толщины и разных электрофизических свойств для достижения комплексного управления микроэлектромеханическими структурами и системами на их базе. В обсуждении указывается на перспективность исследования данных структур и систем как в контексте полимерной микроэлектромеханики или мехатроники, так и в контексте создания нейромиметических сетевых структур для сенсорики и адаптивной моторики, актулируемых пучком заряженных частиц (электронов, ионов) и индуцирующих динамику волоконных МЭМС типа «искусственного мускула», работающих на принципах тейнохимии и хемомеханики полимеров, проявляя управляемое полем адаптивное формирование «нечетких» связей.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, элионика, электронно-пучковая обработка, фокусированный ионный пучок (FIB), времяразрешенная электронная микроскопия, стробоскопическая электронная микроскопия, БПФ в реальном времени, оптоволоконные микроэлектромеханические структуры, сегнетоэлектрические полимеры, пьезоэлектрические полимеры, «наноспорт».

Финансирование: Государственное задание Министерства образования и науки РФ (FFZE-2022-0009 «Полимеры и композиционные материалы нового поколения с заданными комплексами механических и функциональных свойств: синтез, структура и свойства, теория и моделирование»).

Автор для переписки: Градов Олег Валерьевич, gradov.chph.ras@gmail.com

Введение

Проблемы взаимодействия микроэлектромеханических систем и структур с электронными и ионными пучками представляют существенный интерес, как минимум, с конца 1990-х – начала 2000-х гг. С одной стороны, возможно получение MEMS в технологических процессах элионики с использованием электронно-пучковой обработки и ионных пучков (FIB). С другой стороны, получаемые микроэлектромеханические системы могут быть предметом управления, реализуемого с использованием электронных и ионных пучков (например, поляризация пьезоэлектрических микроструктур под электронным пучком, что, в частности, используется для управления кантилеверами в методах с интеграцией атомно-силовой / зондовой микроскопии и электронной микроскопии), или управлять электронным пучком (например, действуя как реактивные динамические апертуры).

Общеизвестны «жесткие» электронно-пучковые методы создания MEMS-сенсоров и MEMS-актуаторов, включая технологии EBL (electron beam lithography) и EBE (electron beam evaporation) [1-5], а также методы управления электронным пучком электронных микроскопов и систем нанолитографии (под вакуумной откачкой) с помощью MEMS [6-12]. В части последних сами MEMS возбуждаются под действием электронного пучка и сопутствующего электрического или магнитного поля (например, создаваемого с помощью электростатического или магнитного конденсатора). Управление механической активностью элементов MEMS с помощью электронных и ионных пучков, по очевидным причинам, может быть интерпретировано как равнозначная альтернатива классической электростатической актуации MEMS [13-25].

Однако в реальной лабораторной практике управление ими с помощью электронных пучков практикуется редко, вследствие атмосферных условий, в которых проецирование электронного пучка является проблематичным (учитывая процессы в газовой среде). Тем не менее, для космических и экзосферных условий создание управляемых электронным либо ионным пучком MEMS представляется оправданным и целесообразным. Создание MEMS для космического использования активно обсуждаются и прорабатывается более 20 лет [26-33]. При этом пик пришелся на вторую треть 2000-х гг., так как в этот период NASA / Jet Propulsion Laboratory (George T. и др.) интенсивно продвигала эти исследования и лоббировала их использование в космических телескопах для различных спектральных диапазонов (вплоть до вакуумного ультрафиолетового и рентгеновского излучения [34], а также орбитальных телескопов космических лучей [35, 36]). К настоящему времени множество микроэлектромеханических систем функционируют в космических телескопах и космических спектрографах в условиях космического вакуума – например, в составе приводов адаптивной и сегментированной зеркальной оптики [37-39].

Одним из наиболее известных космических инструментов, снабженных микроэлектромеханикой в качестве привода оптики является космический телескоп «Джеймс Уэбб» (James Webb Space Telescope, JWST) – орбитальная инфракрасная обсерватория с самым большим в истории человечества зеркалом (сегментированное зеркало общим диаметром 6,5 метра), у которого, в частности, MEMS управляет микрозатворами [40, 41]; однако надо отметить, что на наземной обсерватории «Джемини» также используют системы на основе MEMS, в частности – в мультиобъектных спектрографах инфракрасного диапазона [42] (при том, что диаметр зеркал обоих оптических / инфракрасных телескопов Gemini South Telescope составляет 8,1 метра). В рамках темы данной статьи можно было бы не останавливаться на принципах устройства космической многоканальной «полупроводниковой иконики», обеспечиваемых с использованием данных микроэлектромеханических систем (стробирование, диафрагмирование, аподизация), однако вполне очевидно, что в условиях

космического вакуума и действия корпускулярной компоненты космического излучения данные управляющие структуры неизбежно будут давать сбои.

Очевидно, что при моделировании действия космического пространства на MEMS нецелесообразно игнорировать космические лучи – элементарные частицы различного заряда (например, протоны [43-45]), вызывающие в них не только Single Event Upsets, но и более сложные сбои, связанные с утечками заряда [46]. Для бистабильных MEMS особо фатален эффект искажения пространственного заряда [47], поэтому действие заряженных элементарных частиц в особой мере опасно. Поэтому на стадии наземных испытаний, как правило, необходим метод моделирования воздействия элементарных частиц различного заряда на MEMS.

Кроме того, вторично-эмиссионная рентгеновская компонента космических лучей (возникающая аналогично тому, как происходит генерация при спектроскопии вторично-эмиссионного рентгеновского излучения в материале под электронным пучком в СЭМ) также может быть интересна для анализа, ввиду того, что существуют и разрабатываются элементы MEMS для рентгеновской оптики и рентгеновские детекторы с MEMS, работа которых может быть нарушена за счет артефактов селективной эмиссии под действием космических частиц [48-52].

Единственным методом исследования, позволяющим позиционно-чувствительно отслеживать динамику MEMS под потоком заряженных частиц (и с учетом эмиссии характеристического рентгеновского излучения), на наш взгляд, является сканирующая электронная микроскопия с временным разрешением (time-resolved SEM) и/или методы воздействия сфокусированным ионным пучком на материал в электронной микроскопии (FIB-SEM, для космических криовакуумных условий – CryoFIB-SEM), в том числе – с картированием элементного состава [53]. Фотоакустическая микроскопия как более распространенный метод динамической характеристики MEMS может, в принципе, использоваться в составе комплексов CLEM (корреляционной оптической и электронной микроскопии) для анализа MEMS, но не может

использоваться самостоятельно для этих целей – работая в ином спектральном диапазоне [54].

1. Обоснование методологии эксперимента

Нами предлагается и реализуется в данной работе новый подход к 4D (позиционно-чувствительному с временным разрешением) мониторингу / управляемому исследованию динамики вакуумных MEMS под электронным пучком, базирующийся на применении методов сканирующей электронной микроскопии (для высоких рабочих частот MEMS – стробоскопической электронной микроскопии), регистрации диэлектрической зарядки поверхности активных элементов MEMS и аналогичного картирования EDXRS, если это возможно. В данной работе мы осветим регистрацию с миллисекундным разрешением на СЭМ, однако допустимы любые частоты, «скважности» и дискретизации сбора данных, совместимые с системой регистрации в стробоскопической электронной микроскопии: вплоть до порядка 100 МГц в старых конструкциях [55] и до гигагерц в новых [56]; вплоть до субнаносекундных или пикосекундных длительностей стробирования [57]; вплоть до ультразвуковых и радиочастотных (под-)диапазонов частот индуцируемых процессов в камере [58,59] (последние требования крайне важны – ибо многие типы MEMS способны принимать сигнал, как антенны, и работать на высоких частотах [60-64]).

Следовательно, время-разрешенная и стробоскопическая микроскопия на различных модуляционных скоростях и диапазонах зондирования является, в рамках данной логики, средством не только регистрации, но и зондирования сигналом, селективного по запуску отдельных функциональных элементов MEMS. При реализации прогрессивных методов исследования, основанных на анализе изображений, можно качественно восстановить как динамику отдельных структур, филаментов, кантилеверов, движущихся непосредственно под пучком электронного микроскопа (например, регистрируя вибрации, как в [65]), так и установить их механические связи друг с другом, анализируя корреляцию их

динамики и синхронизм, сонаправленность микроперемещений, индуцируемых электронным пучком в микроэлектромеханической структуре.

2. 2D FFT с временным разрешением для видеопотока как альтернатива стробоскопической оптической дифрактометрии в анализе динамики MEMS

Так как известно, что MEMS могут использоваться как модуляторы излучения или программируемые динамические дифракционные решетки, модуляторы и дефлекторы, моно- или полихроматоры или переключатели [66-84], рационально отслеживать их динамику по изменению дифрактограмм пучка на них, т.е. двумерных Фурье-спектров (2D FFT) и вычисляемых на их основе ИЧХ (интегральных частотных характеристик) [85-91] или предпочитаемых нами за наглядность при анализе динамики регулярных микроэлектромеханических структур ИПХ (интегральных пространственных характеристик) [92, 93], ранее использовавшихся для анализа динамики иных систем, морфологически меняющихся во времени и пространстве [94-97] (в том числе при сканирующей электронной микроскопии, в особенности – времяразрешенной электронной микроскопии [98-101]).

Нами для этого использовалась программа QAVIS, разработанная специалистами из Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ДВО РАН) на базе библиотеки FFTW (Гончарова А.А., Фищенко В.К.) и показавшая себя как надежный метрологический инструмент для анализа динамики крупномасштабных океанологических структур в реальном времени и по видеозаписям [102-104] (волны, течения, колебания уровня моря [105-110], изменения ледяного покрова по данным спутникового мониторинга [111, 112]). Ранее нами данная программа впервые была с успехом использована для анализа систем, подобных радиочастотным флюидным чипам и биомедицинским лабораториям на чипе [113, 114]. Поэтому использование ПО QAVIS для анализа динамики микроэлектромеханических систем, исследуемых под электронным

микроскопом с временным разрешением (в TV-режиме) представляется оправданным.

3. Требования к исследуемым образцам для низковольтного случая

Общеизвестно, что в стандартных микроэлектромеханических системах используют, как правило, твердотельные элементы, например на основе пьезоэлектрической керамики или сплавов с памятью формы, в том числе – в форме тонких пленок или гетероструктур [115,116] (как правило, нитинол-интерметаллид, соединение титана и никеля, в процентном соотношении 45 % Ti – 55 % Ni с равным количеством атомов каждого вещества, однако встречаются также варианты с отличной стехиометрией и добавками типа меди, TiNiCu; однако исторически с 1990-х гг. в технологических процессах преобладает стандартный TiNi [117-128]). Однако же воздействие электронным пучком на них с целью управления динамикой при использовании обычных растровых электронных микроскопов (не сверхвысоковольтных) сильно затруднено, так как подразумевает либо использование высоких ускоряющих напряжений (и флюенсов пучка), либо внедрение дополнительных микроманипуляторов и нагревателей. В недавней работе в «Журнале радиоэлектроники» по изготовлению кольцевых, петлевых и подвешенных структур на основе нанопроволок с применением нанопинцетов на основе сплава с эффектом памяти формы Ti_2NiCu [129], применена система на основе композитных микроинструментов, в состав которой входят «сканирующий электронный микроскоп и ионный микроскоп с системой фокусированного ионного пучка CrossBeam Neon40 EsB (Carl Zeiss) с двумя наноманипуляторами Kleindiek, в вакуумной камере которого производится наносборка», причем «наноманипулятор... снабжен нанопинцетом с резистивным микро нагревателем, который размещен на кончике вольфрамовой иглы». Этот сверхвысокоуровневый метод, базирующийся на уникальной установке, демонстрируя высокий уровень квалификации и экспериментального мастерства авторов, тем не менее, вполне очевидно, не может быть масштабирован во

множестве лабораторий, снабженных стандартными сканирующими электронными микроскопами, в том числе – работающими в низковольтных режимах (до единиц киловольт; LVEM). Поэтому нами было предложено перейти от твердотельных к полимерным структурам, для деформации и управления поведением которых достаточны не столь большие флюенсы электронного пучка.

Так же, как и в работе [129], было решено работать с протяженными элементами, из которых можно формировать компоненты микроэлектромеханических структур сложной формы, включая спирали, пружины, замыкающие контакты и т.д. Использование данных полимерных волоконных конструкций, формируемых и управляемых действием пучка *in situ* в колонне электронного микроскопа представляет существенное поле новизны, как в физическом, так и в техническом аспекте.

Хотя разработка полимерных MEMS и полимерных оптических MEMS началась еще в 1990-е гг. [130, 131], а основные методы обработки материала и технологические процессы сложились уже до 2010 г. [132-138], многие наиболее интересные физические проблемы в данной области еще не решены (или не поставлены). В большинстве случаев используется пленочные [139, 140] либо балочные (spring / beam) схемы, а весь потенциал микромеханических конституентов подобных механизмов еще далеко не исчерпан (хотя полимерные пружины микронного или же субмикронного размера в MEMS-инженерии известны [141]). Известны многие способы управления и направления или спектральные диапазоны управления для полимерных MEMS (термические [142], радиочастотные [143], оптические в различных диапазонах [144,145], и т.д.), однако управление с помощью пучка частиц фактически не практикуется. Поэтому предлагаемый подход обладает очевидным элементом новизны.

Главным преимуществом полимерных волоконных MEMS при актуации и гибком перестраиваемом позиционировании являются их механические свойства. В отличие от жестких MEMS, в случае реализации полимерных MEMS это является имманентным свойством материала, а не конструктива

схемы / микроэлектромеханической структуры. Полимеры позволяют достигать высокой гибкости, пластичности, эластичности, вязкого текучего состояния и т.д., а в аспекте циклирования нагрузки лучше металла. Поэтому их использование, особенно в волоконной форме (полученной путем электроформования и экструзии) может быть оправданным для создания MEMS, в которых требуются высокие значения вышеуказанных технических параметров.

4. Материалы и методы

В наших экспериментах использовались волокна и волоконные конструкции на базе сегнетоэлектрических и пьезоэлектрических полимеров, таких как ПВДФ-ГФП, ПЛА и ПГБ (поливинилиден-гексафторпропилен, полилактид, полигидроксibuтират). Вытяжка волокон осуществлялась методами электроспиннинга, в ходе чего волокну придавалась определенная поляризация. Изначально ставилась цель доказательства их изменений под пучком, связанных с их сегнетоэлектрическими свойствами и пьезоэффектом. Однако, по мере развития экспериментальной программы, был осуществлен переход к конструкциям на базе механически сопряженных микроволокон (подобных конструкциям на базе микропроволок описанным в работе [129]).

Исследования производили в TV-режиме на установке времяразрешенной сканирующей электронной микроскопии на базе СЭМ JEOL JSM-T330A (рис. 1), сбор данных с которого осуществлялся с использованием системы на базе цифрового фотоаппарата CANON A590IS с байонетом, кабеля синхронизации затвора и переходника конструкции П.Л. Александрова, распечатанного на 3D принтере (рис. 2). Для удобства воспроизведения схемы, чертеж переходника для воспроизведения описанных экспериментов с временным разрешением на устаревших электронных микроскопах депонирован по лицензии CC BY-SA 3.0 в Autodesk Tinkercad по адресу: <https://www.tinkercad.com/things/2i7MgsxqgKt-sem> (версия от ноября 2018 г.) и приведен на рис. 2. Модель печатается черным PLA филаментом (FDplast) при стандартных настройках, но при подготовке к

печати требуется проследить, чтобы внутри боковой трубки не были добавлены поддержки. При этом, переходник крепится на систему крепления пленочного фотоаппарата, идущую в комплекте с микроскопом JEOL JSM-T330A, а камера дополнительно закрепляется при помощи кабельной стяжки, проходящей через боковую трубку.



Рис. 1. Общий вид установки времяразрешенной микроскопии на базе JEOL T-330A с переходником для камеры с новой резидентной программой и выводом изображения на жидкокристаллический дисплей.

При использовании других камер, выводивших изображение на экран ПК, становился возможным контроль двумерных Фурье-спектров (2D FFT) в реальном времени на ПО QAVIS (которое работает не с файлами, а с памятью экрана, обновляемой операционной системой с высокой частотой), разработанном специалистами Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ДВО РАН) на базе библиотеки FFTW (Гончарова А.А., Фищенко В.К.). Однако преимуществом записи эксперимента в TV-режиме являлась возможность 2D FFT-анализа видеозаписей с произвольной скоростью (от цейтраферной съемки до сверхвысокоскоростных экспериментов) после завершения эксперимента,

с варьируемыми настройками скорости и частоты дискретизации. В дальнейшем, для более сложных механически сопряженных структур, измерения / визуализация межкадровых корреляций (с заданной тактовой задержкой и заданными фильтрами) производились также с использованием ПО QAVIS.

Для удобства дальнейшего доступа и анализа сторонними пользователями записи депонировались в сети Интернет и получали электронный адрес, код доступа в стандарте CODE-128 (он приводится в настоящей статье под последовательностями кадров) и/или QR-код.

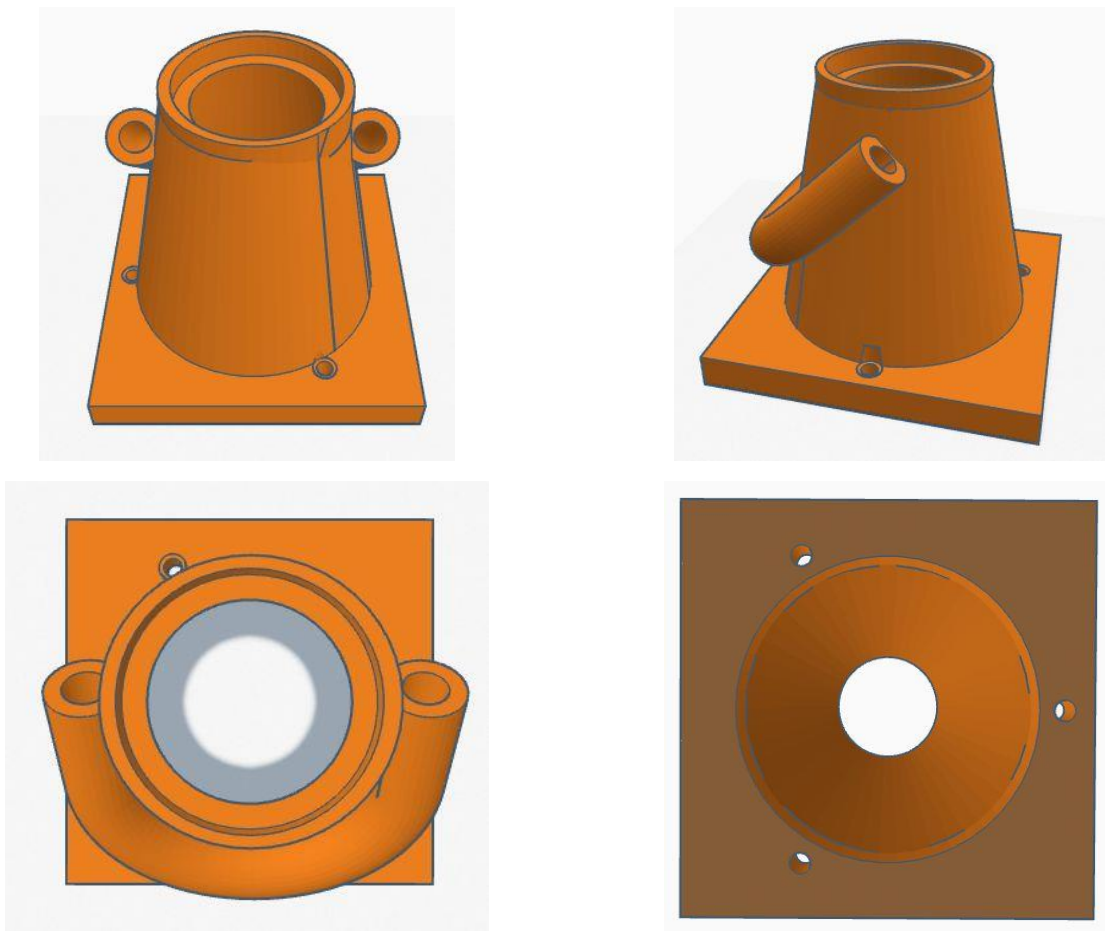


Рис. 2. Модель переходника для оптического подключения цифровой камеры к экрану микроскопа (URL: <https://www.tinkercad.com/things/2i7MgsxqgKt-sem>; автор модели: П.Л. Александров).

5. Доказательство динамики пьезоэлектрических волокон для создания микроэлектромеханических систем: изменение дифракционных паттернов / 2D FFT волоконных конструкций во времени под электронным пучком

В приводимых далее по тексту сериях изображений показываются прямые экспериментальные данные, полученные вышеописанным экспериментальным методом, по времяразрешенному исследованию изменений расстояний между сегнетоэлектрическими и/или пьезоэлектрическими полимерными волокнами (на примере классического представителя полигидроксиалканоатов, имеющего пьезоэлектрические и сегнетоэлектрические свойства при получении волокон электроформованием – полигидроксипутирата) и ориентации микроволокон в пространстве под действием электронного пучка с использованием двумерного преобразования Фурье и вычисления в реальном времени ИЧХ – интегральных пространственных характеристик. Изображения приводятся в первом столбце, двумерные Фурье-спектры (2D FFT) – во втором столбце, ИЧХ (интегральные пространственные характеристики) – в третьем столбце.

Как можно видеть на рисунке 3, после включения высокого напряжения начинается быстрое движение волокон под пучком, которое «релаксирует к квазистационарному состоянию» немногим более, чем через полминуты. До этого момента происходит полная реконфигурация направленности волокон, в зависимости от их положения под пучком СЭМ, как можно видеть из сопоставления двумерных Фурье-спектров и интегральных пространственных характеристик соответствующих изображений для разных моментов времени. После этого также происходят обратимые колебания волокон, но топология сети остается стабильной, что согласуется со стабильностью осей симметрии Фурье-спектров и интегральных пространственных характеристик, угловые отношения которых варьируются лишь на несколько градусов. Код доступа к этой записи в стандарте Code-128 приведен в конце таблицы.

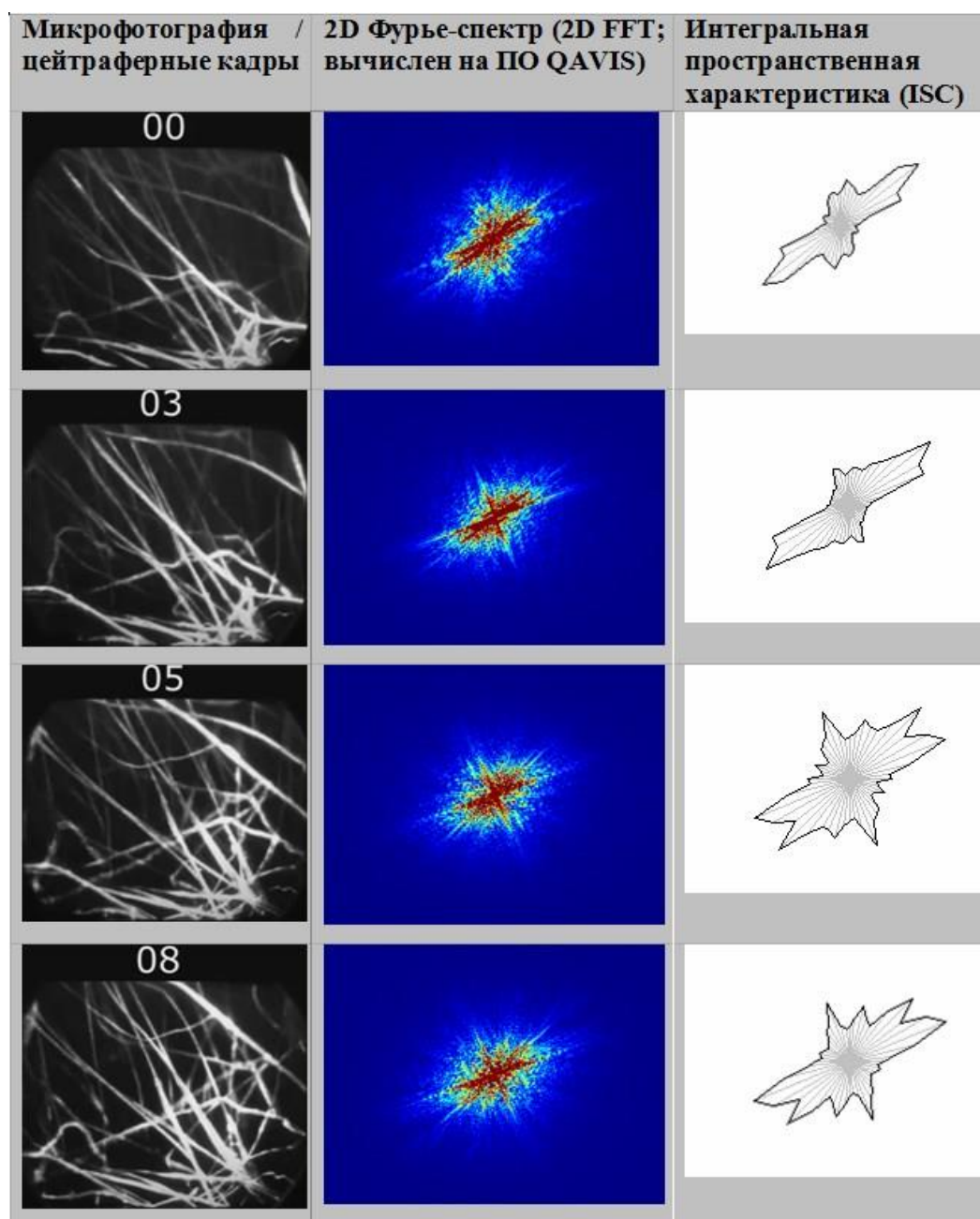


Рис. 3 (а). Анализ цейтраферной регистрации динамики пьезоэлектрических полимерных волокон, полученных методом электроформования, записанной в видеофайл и цейтраферную (time-lapse) выборку кадров (начало серии кадров; продолжение на рис. 3(б)).

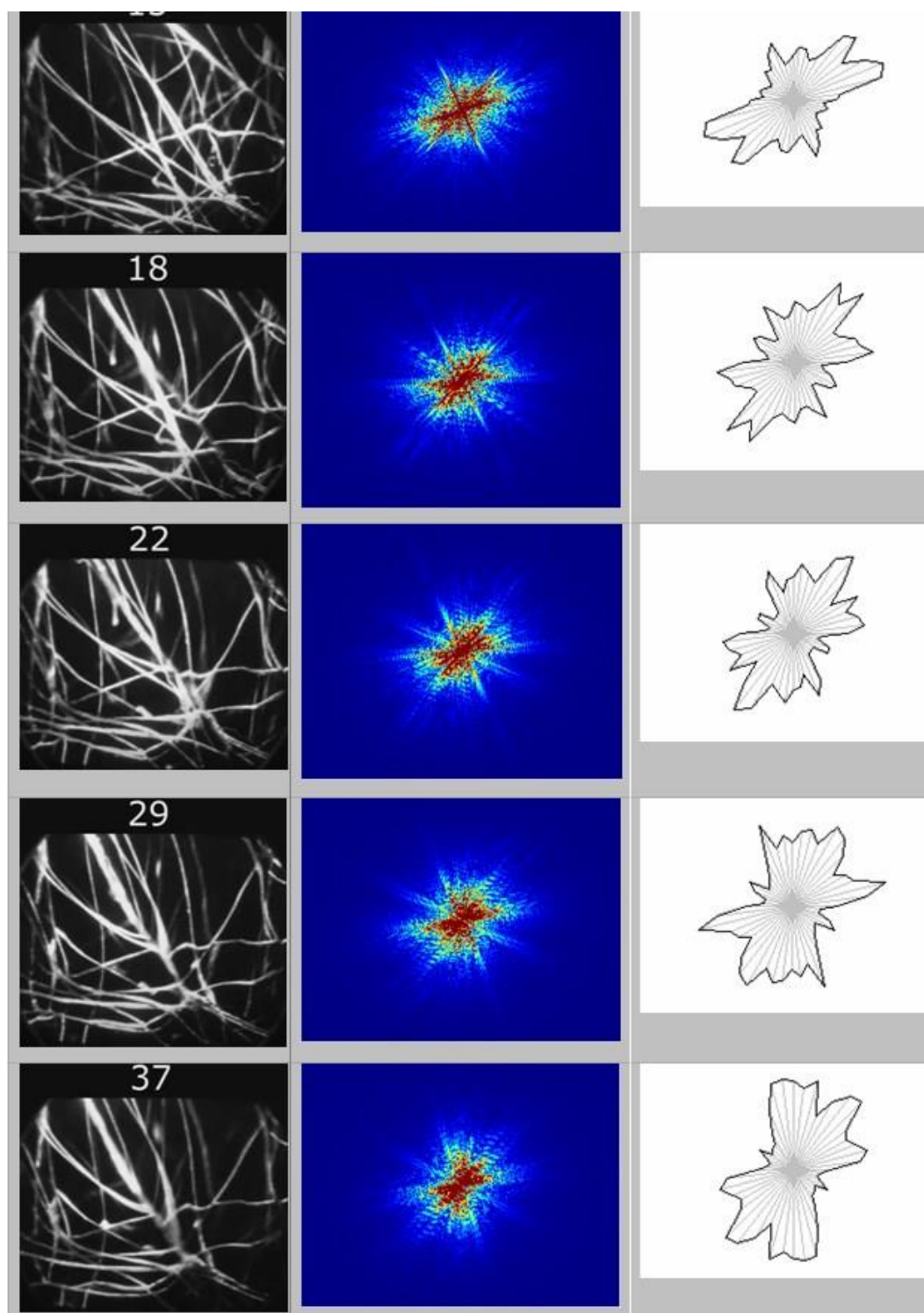


Рис. 3 (б). Анализ цейтраферной регистрации динамики пьезоэлектрических полимерных волокон, полученных методом электроформования, записанной в видеофайл и цейтраферную (time-lapse) выборку кадров (продолжение; начало серии кадров на рис. 3(а)).

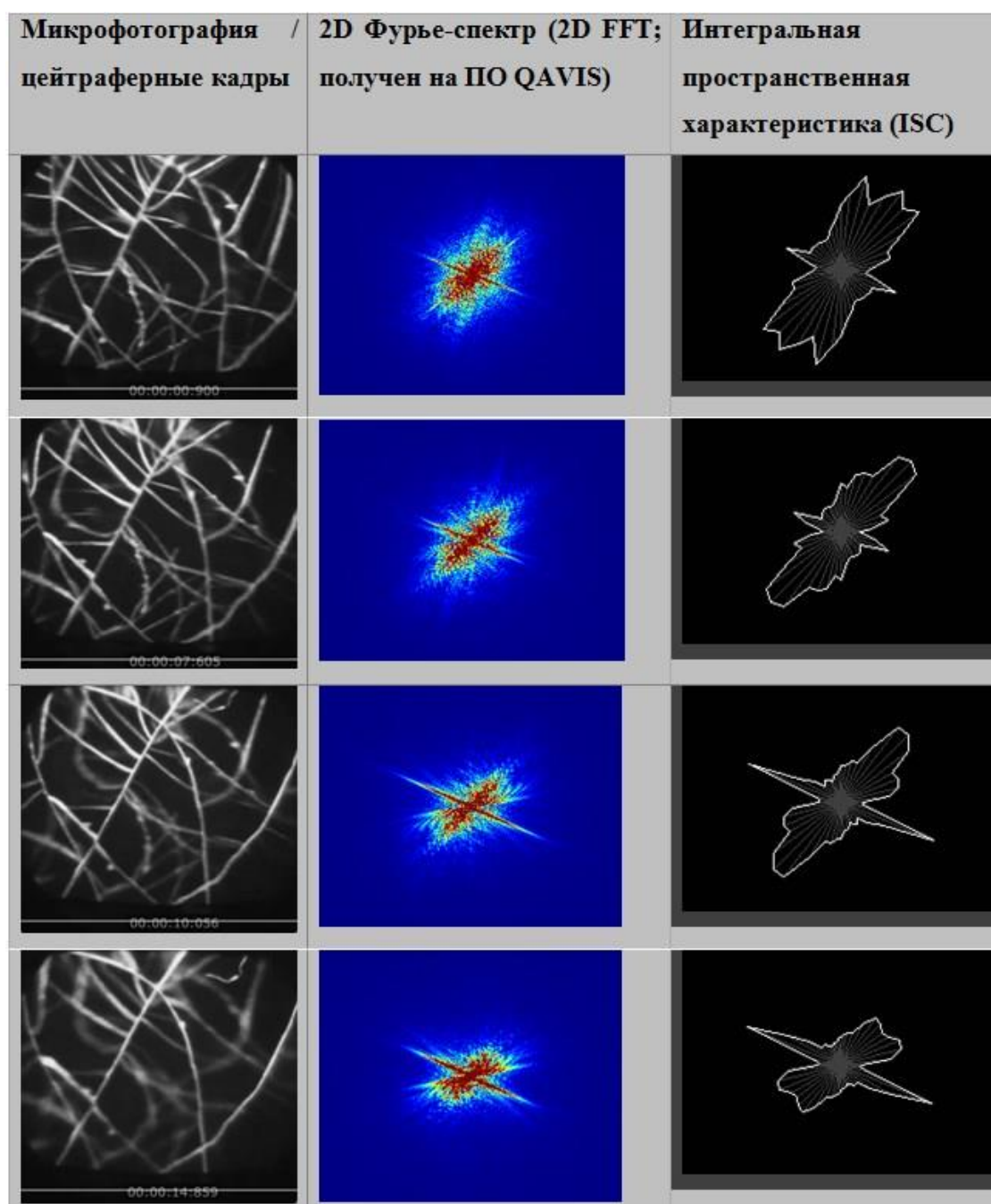


Рис. 4. Быстрое усиление интенсивности пика одной ориентации микроволокон для мягких электромеханических конструкций. Анализ видеорегиограммы динамики волокон в реальном времени из цифрового сетевого источника (все кадры / скриншоты сняты с использованием экрана встроенного html плеера).

В некоторых случаях наблюдаются не плавные движения, приводящие к изменению конфигурации сети под действием электронного пучка, а весьма спонтанные мгновенные изменения, фиксирующиеся по резкому усилению или исчезновению компонент ISC, как то показано на рис. 4 (код в стандарте Code-

128 также приведен в конце таблицы – результат, приведенный в таблице 2, полученный в первой четверти 2020-х гг., анализируется прямо из сетевого источника). Таким образом, регистрируются различные по скорости процессы движения и релаксации сети, определяемой зарядом и механикой волокон, что можно использовать для управления дифракцией на них вплоть до использования их как пространственных модуляторов света.

6. Возможна ли программируемая перестройка полных конструкций на базе сетей волоконных микроэлектромеханических структур под действием электронного пучка?

В некоторых случаях наблюдается перестройка целых конструкций – что может быть применено для индуцируемой управляемой электронным пучком микроробототехники. Так, на рисунке 5 приведены кадры стробоскопической СЭМ и коррелограммы, снятые с временным разрешением 0.4 секунды, для участка такой перестраиваемой сетевой структуры. Возможно видеть, что воздействие электронным пучком влечет за собой механические изменения связанной микромеханической структуры в целом.

При этом разные волокна функционируют как «домкраты», «приводные ремни», «пружины», «упругие балки», «толкатели» и т.д. Эффект перестройки структур зависит от размера облучаемого участка (ROI SEM), то есть с зоной эффективного сечения фокусируемого или сканирующего электронного пучка. Код доступа к приведенной записи в стандарте Code-128 также приведен в конце таблицы.

Аналогичным образом можно отслеживать колебания пружиноподобных элементов, сворачивающихся или разворачивающихся или меняющих свою спирализацию под пучком, как это показано далее на рисунке 6.

Можно видеть, что при возникновении в поле зрения пружиноподобной структуры и изменении ее геометрии (скручивания) и перемещении в пространстве происходит явно видимое изменение вейвлетной картины (вейвлет

Морле), как видно из части кадра, где кнопка Re не нажата. Код доступа к этой записи в стандарте Code-128 приведен в конце таблицы.

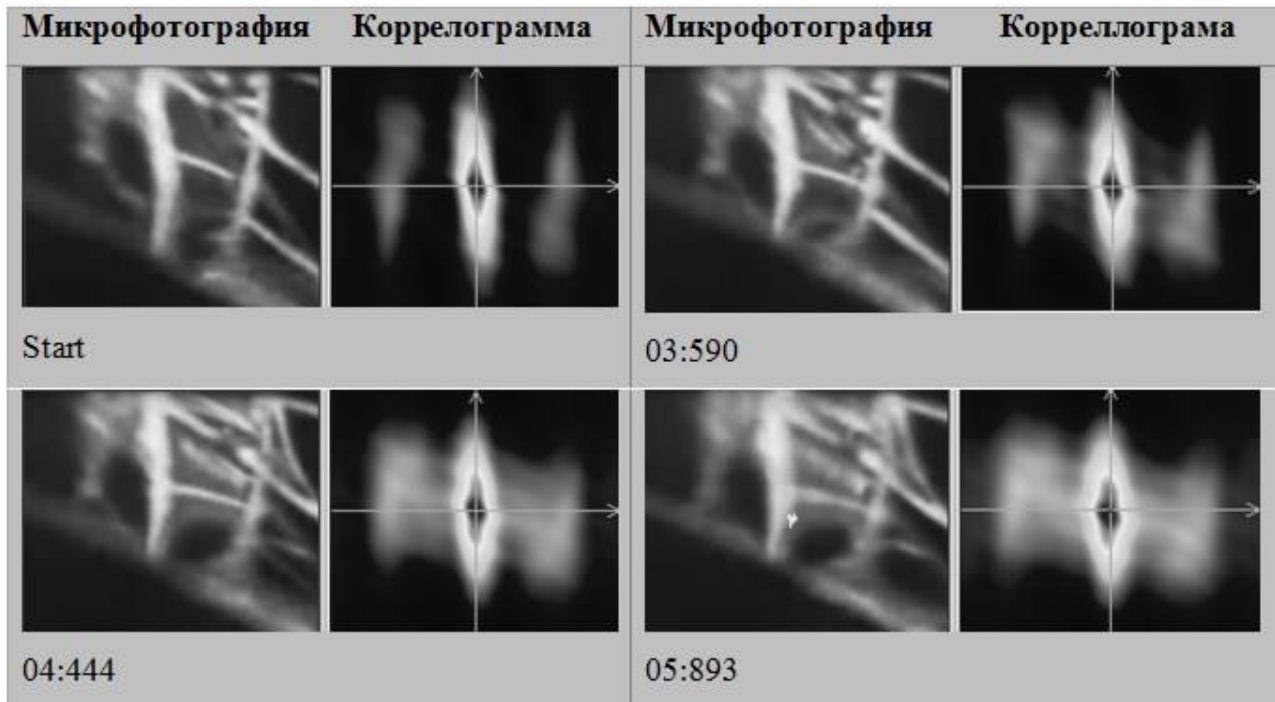


Рис. 5. Анализ микромеханических перемещений в узле волокон, подобном запирающим элементам в микроэлектромеханических структурах, с помощью коррелограммы.

Можно подтвердить положение о выполнении одними (более толстыми) волокнами функций несущих элементов механической прочности, а другими (тонкими) – управляемых электронным пучком гибких элементов. Обратимся для этого к опыту с двумя такими структурами. На рисунке 6 можно видеть, что происходит движение тонкого гнущегося волокна (нанонить в верхней части микрофотографии) при стабильности крупного (по центру). Его особенности можно отслеживать по данным вейвлетного преобразования (вейвлет Морле) в Re и Im областях (так, например, здесь можно наблюдать дрейф экстремума на конкретной вейвлетной репрезентации). Код доступа к этой записи в стандарте Code-128 приведен в конце таблицы.

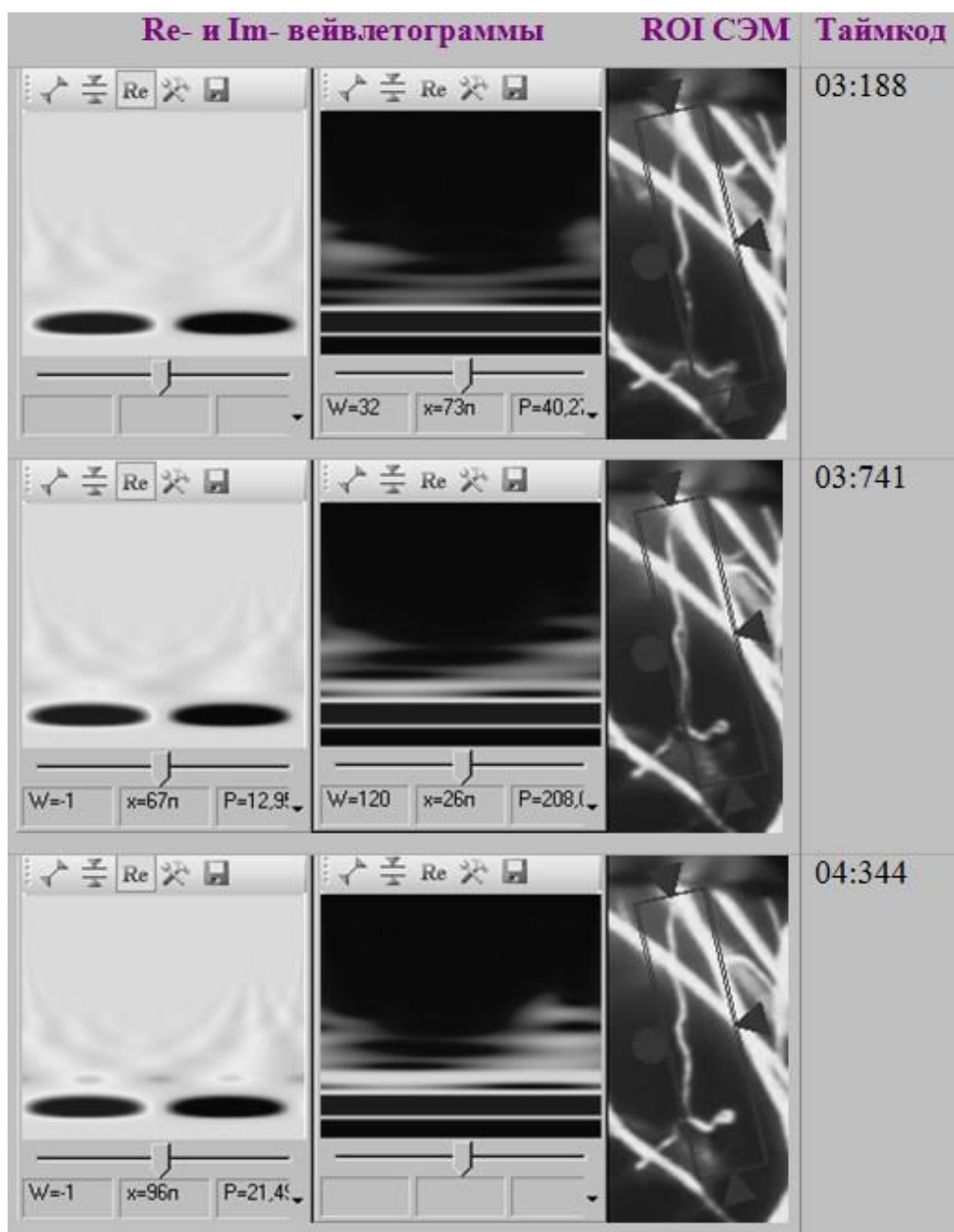


Рис. 6. Комплексный (Re, Im) вейвлетный анализ спирализующейся под пучком «пружинной» волоконной микроэлектромеханической полимерной структуры (начало, продолжение на следующей странице).

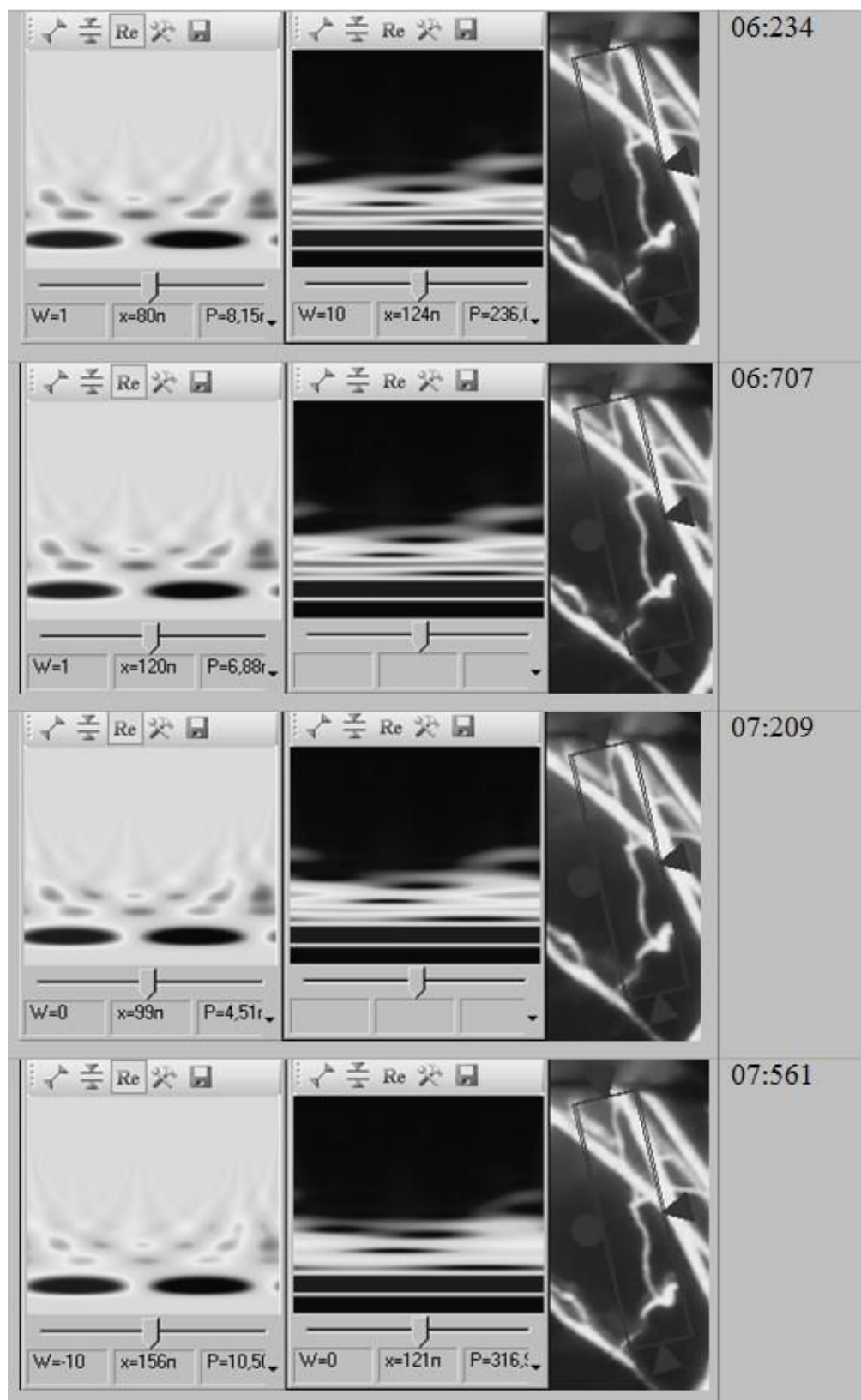


Рис. 6. Комплексный (Re, Im) вейвлетный анализ спирализующейся под пучком «пружинной» волоконной микроэлектромеханической полимерной структуры (продолжение, начало на предыдущей странице).

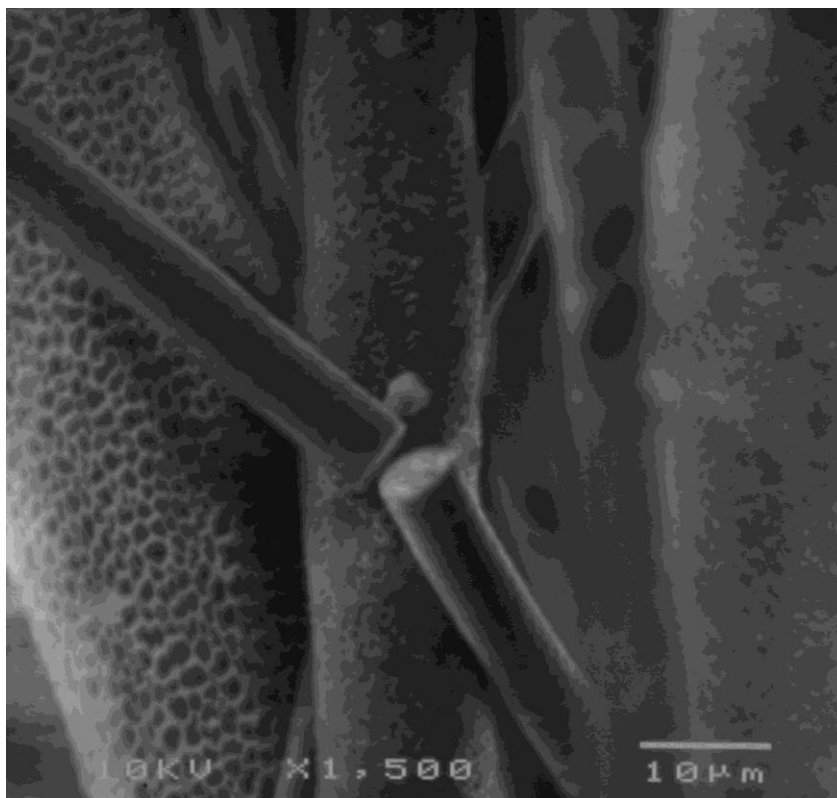


Рис. 7. Пример излома волокна с добавкой мономера гидроксиэтилметакрилата. Сканирующая электронная микроскопия на JEOL JSM-T330A, сбор данных с которого осуществлялся с использованием разработанной П.Л. Александровым системы на базе цифрового фотоаппарата CANON A590IS.

Если одни волокна должны колебаться, двигаться, сокращаться как пружины (тонкие волокна), а другие выполнять каркасную функцию (толстые волокна), то нужно оценивать микромеханические свойства волокон в динамике. Очевидно, что излом волокна – это возможная причина поломки управляемых микроэлектромеханических структур на его основе. Поэтому целесообразно для каждого химического или микро/нано-структурного класса волокон производить в СЭМ механические испытания под действием пучка на изгиб. В некоторых случаях механика волокон может быть неадекватной предполагаемой функции. Тогда от использования волокон данной толщины и состава или структуры и метода получения в целях робототехники и MEMS надо отказаться. Пример излома волокна на электронной микрофотографии дан на рис. 7.

7. Обсуждение

Таким образом, создаются основы для полимерных MEMS-сетей с различным типом механических элементов, контролируемо меняющих форму и механические свойства во времени, то есть актулируемых под электронным пучком СЭМ (либо напрямую, либо с использованием собственных свойств сегнетоэлектрического и пьезоэлектрического полимерного материала). Это хорошо вписывается в тренды развития MEMS-технологии в аспекте создания сетевых конструкций.

Сети нановолокон используются для гибридных и сочетающих в себе нано- и микро- размерности микросборок и микросхем в ролях не только сенсорного, но и актуаторного, и гибридного характера [146]. В рамках разработки бионических систем вычислений, сенсорики и моторики генеральной проблемой становится создание сетевых (наподобие аналоговых нейросетей) и взаимно-регулируемых бионических полимерных волоконных структур и разработка специальных типов контакта для них [147]. Можно бы опираться на принципы организации нервно-мышечного моторного синапса [148-150], однако он, как известно, требует химической актуации (в виде передачи нейромедиатора-ацетилхолина), а поэтому более рациональной кажется возможность разработки и внедрения аналогов на принципах эфасов (электрических синапсов) и объемной передачи. Хорошим примером моделирования полевого управления наведением волокон в эфаптических структурах и так называемой объемной передачи полем могут являться новые методы, основанные на использовании электрического поля или, как в предлагаемом нами типе экспериментов, пучка электронов, непосредственно актулирующего бионическую сеть.

Для полимерных волокон микроэлектромеханических систем, где, по механическим причинам, может иметь место нечеткий отклик конструкта (fuzzy response) и спонтанное формирование незапрограммированных контактов между волокнами и проявление новых механических ролей данных волокон, использование упорядочивающего пучка может являться в отдаленном будущем

способом их использования в нечеткой логике для нестандартных форм вычислений. При этом сам факт обнаружения нечеткого отклика и его пределов для данных волокон и их сетей является, в некотором смысле, диагностикой их механических свойств, поэтому, в сущности (как можно видеть и из рис. 3 с изломом волокна), давая нагрузку на сеть полимерных волокон в MEMS, мы проводим тест их нечетких механических свойств как логических или иных переключателей «коннектома сети» (это направление прямо формируется из известных работ по трибологии волокон для микроэлектромеханических структур [151]).

Иначе говоря, предлагаемая форма времяразрешенного эксперимента с электронно-пучковым воздействием на полимерные волокна и конструкты, применимые в создании функциональных эластичных полимерно-волоконных микроэлектромеханических структур, в том числе – с нечетким адаптивным позиционированием (fuzzy fiber MEMS) во внешнем поле или под пучком, на базе ферроэлектрических и пьезоэлектрических полимерных микроволокон, являясь качественно новым направлением исследований, тем не менее, целиком следует из предшествующего развития смежных направлений исследований. Переход от жестких твердотельных MEMS и изготовления изделий из микропроволок и нанопроволок путем «наноспорта» («nanosport» – термин из статьи [129] «Creating nano-wire based ring, loopoing and suspended structures by the method of “bottom-up” mechanical nanosport» // *Journal of Radio Electronics*; February 2019) к MEMS на базе полимеров и частично упорядоченных сред является логичным следствием общего развития уровня техники, однако внедрение и технологическое развитие полимерных волоконных MEMS в практические разработки ожидается не ранее начала 2030-х гг., одновременно с новыми направлениями развития вычислительной техники и робототехники, делающими оправданными их применение на практике. Поэтому на данный момент мы можем только регистрировать / констатировать наличие ожидаемых механических эффектов перестройки структур под действием пучка, а также возможность совместного кооперативного действия волокон в узловых

системах, позволяющую говорить об их технологическом применении в будущем.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (FFZE-2022-0009 «Полимеры и композиционные материалы нового поколения с заданными комплексами механических и функциональных свойств: синтез, структура и свойства, теория и моделирование»).

Благодарности. Авторы благодарят за помощь в создании экспериментальных установок на базе сканирующих электронных микроскопов (и рентгеновских волнодисперсионных спектрометров) сотрудников Отдела экспериментальной техники ФИЦ ХФ РАН: В.С. Калинина, Е.Н. Кульпина, Е.Н. Селиверстову, А.В. Холявко, изготавливавших экспериментальные компоненты для СЭМ в соответствии с эскизами и чертежами М.К. Филиппова и О.В. Градова. Авторы благодарят разработчиков уникального программного обеспечения для анализа изображений в реальном времени на базе библиотеки FFTW из Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН А.А. Гончарову и В.К. Фищенко за предоставленное программное обеспечение и поддержку в его внедрении в микроскопическую практику, начиная с 2018 года. Третий автор благодарит М.А. Градову (ФИЦ ХФ РАН) за литературную корректуру текста.

Авторский вклад:

- **П.Л. Александров** – автоматизация системы электронной микроскопии с возможностью внутренней синхронизации регистрации изображений на цифровой регистратор; разработка и изготовление / печать переходников для различных типов цифровых камер для времяразрешенного анализа;
- **Е.Л. Бурьянская** – серийная обработка данных / изображений волокон и микроэлектромеханических структур и систем из сегнетоэлектрических полимеров;

- **О.В. Градов** – концептуализация, библиографический обзор, проведение экспериментов по времяразрешенной электронной микроскопии МЭМС и полимерных волоконных структур;
- **А.Л. Иорданский** – идеология использования волоконных имплантатов в качестве нейромиметических систем, поддерживающих регенеративные процессы в нейроэлектронике, концептуализация¹;
- **И.А. Маклакова** – участие в накоплении данных по динамике волокон и волоконных микроэлектромеханических структур методами электронной микроскопии с временным разрешением (2021-2024);
- **А.А. Ольхов** – изготовление волокон и волоконных конструкций на базе сегнетоэлектрических и пьезоэлектрических полимеров (ПВДФ, ПВДФ-ГФП, ПЛА, ПГБ);
- **А.В. Ратновская** – участие в накоплении данных по динамике волокон и волоконных микроэлектромеханических структур методами электронной микроскопии с временным разрешением (2019-2021);
- **С.Н. Холуйская** – изготовление микроволокон с использованием ГЭМА (мономера гидроксиэтилметакрилата).

Авторы перечислены по алфавиту во избежание споров о величине вклада.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Литература

1. Zhou H., Chong B.K., Stopford P., Mills G., Midha A., Donaldson L., Weaver J.M.R. Lithographically defined nano and micro sensors using “float coating” of resist and electron beam lithography // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. – 2000. – Т. 18. – №. 6. – С. 3594-3599.
<https://doi.org/10.1116/1.1321271>

¹ <https://www.vyatsu.ru/internet-gazeta/fotogalereya/leksii-v-politehnicheskom-1/aleksey-iordanskiy-poslednim-organom-podlezhaschim.html>

2. Chase J.G., Smith B.W. Overview of modern lithography techniques and a MEMS-based approach to high throughput rate electron beam lithography // Journal of intelligent material systems and structures. – 2001. – Т. 12. – №. 12. – С. 807-817. <https://doi.org/10.1177/104538901400438109>
3. Schuhmann T., Protz J., Fields D., Yin H., Cross A., He W., Bowes D., Ronald K. Phelps A. A MEMS fabrication approach for a 200GHz microklystron driven by a small-scaled pseudospark electron beam // Proc. SPIE. – 2010. – Т. 7837. – С. 42-47. <https://doi.org/10.1117/12.864902>
4. Singh K., Joyce R., Varghese S., Akhtar J. Fabrication of electron beam physical vapor deposited polysilicon piezoresistive MEMS pressure sensor // Sensors and Actuators A: Physical. – 2015. – Т. 223. – С. 151-158. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.12.033>
5. Bhat S.P., Subhani K.N., Purakkat S. Plasma-assisted electron beam evaporation of low stress aluminium films for MEMS applications // ISSS Journal of Micro and Smart Systems. – 2021. – Т. 10. – №. 1. – С. 33-39. <https://doi.org/10.1007/s41683-021-00067-4>
6. Chase J.G., Smith B.W. MEMS-based precision motion control approach to high-throughput-rate electron beam lithography // Proc. SPIE. – 2001. – Т. 4592. – С. 450-461. <https://doi.org/10.1117/12.449002>
7. Kim H., Han C., Lee K. The Multi Arrayed Micro-scale Electron Optical System for Electron Beam Lithography using MEMS Technology // 電子情報通信学会技術研究報告 = IEICE technical report: 信学技報. – 2002. – Т. 102. – №. 177. – С. 27-31.
8. Grella L., Carroll A., Murray K., McCord M.A., Tong W.M., Brodie A.D., Gubiotti T., Sun F., Kidwingira F., Kojima S., Petric P. Digital pattern generator: an electron-optical MEMS for massively parallel reflective electron beam lithography // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS. – 2013. – Т. 12. – №. 3. – С. 031107-031107. <https://doi.org/10.1117/1.JMM.12.3.031107>

9. Kojima A., Ikegami N., Yoshida T., Miyaguchi H., Muroyama M., Nishino H., Yoshida S., Sugata M., Ohyi H., Koshida N., Esashi M. Massively parallel electron beam direct writing (MPEBDW) system based on micro-electro-mechanical system (MEMS)/nanocrystallineSi emitter array // *Alternative Lithographic Technologies VI.* – SPIE, 2014. – T. 9049. – C. 240-246.
10. Ichimura T., Ren Y., Kruit P. A large current scanning electron microscope with MEMS-based multi-beam optics // *Microelectronic engineering.* – 2014. – T. 113. – C. 109-113. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2013.07.008>
11. Kojima A., Ikegami N., Yoshida T., Miyaguchi H., Muroyama M., Yoshida S., Totsu K., Koshida N., Esashi M. Development of a MEMS electrostatic condenser lens array for nc-Si surface electron emitters of the Massive Parallel Electron Beam Direct-Write system // *Proc. SPIE.* – 2016. – T. 9777. – C. 201-209. <https://doi.org/10.1117/12.2219338>
12. Lobato-Dauzier N., Denoual M., Sato T., Tachikawa S., Jalabert L., Fujita H. Current driven magnetic actuation of a MEMS silicon beam in a transmission electron microscope // *Ultramicroscopy.* – 2019. – T. 197. – C. 100-104. <https://doi.org/10.1016/j.ultramicro.2018.12.002>
13. Bochobza-Degani O., Elata D., Nemirovsky Y. An efficient DIPIE algorithm for CAD of electrostatically actuated MEMS devices // *Journal of Microelectromechanical Systems.* – 2002. – T. 11. – №. 5. – C. 612-620. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2002.803280>
14. Allen M., Raulli M., Maute K., Frangopol D.M. Reliability-based analysis and design optimization of electrostatically actuated MEMS // *Computers & structures.* – 2004. – T. 82. – №. 13-14. – C. 1007-1020. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.03.009>
15. Zhu G., Lévine J., Praly L., Peter Y.A. Flatness-based control of electrostatically actuated MEMS with application to adaptive optics: a simulation study // *Journal of Microelectromechanical Systems.* – 2006. – T. 15. – №. 5. – C. 1165-1174. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2006.880198>

16. Zhang W.M., Meng G. Nonlinear dynamic analysis of electrostatically actuated resonant MEMS sensors under parametric excitation // IEEE sensors journal. – 2007. – Т. 7. – №. 3. – С. 370-380. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2006.890158>
17. Zhang W.M., Meng G., Chen D.I. Stability, nonlinearity and reliability of electrostatically actuated MEMS devices // Sensors. – 2007. – Т. 7. – №. 5. – С. 760-796. <https://doi.org/10.3390/s7050760>
18. Guo Z.J., McGruer N.E., Adams G.G. Modeling, simulation and measurement of the dynamic performance of an ohmic contact, electrostatically actuated RF MEMS switch // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2007. – Т. 17. – №. 9. – С. 1899-1909. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/9/019>
19. De Pasquale G., Somà A. Dynamic identification of electrostatically actuated MEMS in the frequency domain // Mechanical systems and signal processing. – 2010. – Т. 24. – №. 6. – С. 1621-1633. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.01.010>
20. Alsaleem F.M., Younis M.I., Ruzziconi L. An experimental and theoretical investigation of dynamic pull-in in MEMS resonators actuated electrostatically // Journal of Microelectromechanical systems. – 2010. – Т. 19. – №. 4. – С. 794-806. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2010.2047846>
21. Wang B., Zhou S., Zhao J., Chen X. Size-dependent pull-in instability of electrostatically actuated microbeam-based MEMS // Journal of Micromechanics and microengineering. – 2011. – Т. 21. – №. 2. – С. 027001. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/21/2/027001>
22. Zhang W.M., Tabata O., Tsuchiya T., Meng G. Noise-induced chaos in the electrostatically actuated MEMS resonators // Physics Letters A. – 2011. – Т. 375. – №. 32. – С. 2903-2910.
23. Ouakad H.M. An electrostatically actuated MEMS arch band-pass filter // Shock and Vibration. – 2013. – Т. 20. – №. 4. – С. 809-819. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2011.06.020>

24. Caruntu D.I., Martinez I. Reduced order model of parametric resonance of electrostatically actuated MEMS cantilever resonators // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2014. – Т. 66. – С. 28-32.
<https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2014.02.007>
25. Ramini A.H., Hennawi Q.M., Younis M.I. Theoretical and experimental investigation of the nonlinear behavior of an electrostatically actuated in-plane MEMS arch // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2016. – Т. 25. – №. 3. – С. 570-578. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2016.2554659>
26. Cass S. MEMS in space // IEEE Spectrum. – 2001. – Т. 38. – №. 7. – С. 56-61.
<https://doi.org/10.1109/6.931884>
27. George T. MEMS/NEMS development for space applications at NASA/JPL // Proc. SPIE. – 2002. – Т. 4755. – С. 556-567. <https://doi.org/10.1117/12.462856>
28. Lafontan X., Pressecq F., Beaudoin F., Rigo S., Dardalhon M., Roux J.L., Schmitt P., Kuchenbecker J., Baradat B., Lellouchi D., Le-Touze C. The advent of MEMS in space // Microelectronics Reliability. – 2003. – Т. 43. – №. 7. – С. 1061-1083.
[https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(03\)00120-3](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(03)00120-3)
29. Farrar D., Schneider W., Osiander R., Champion J.L., Darrin A.G., Douglas D., Swanson T.D. Controlling micro electromechanical systems (mems) in space // AIP Conference Proceedings. – 2003. – Т. 654. – №. 1. – С. 180-186.
<https://doi.org/10.1063/1.1541293>
30. George T. Overview of MEMS/NEMS technology development for space applications at NASA/JPL // Proc. SPIE. – 2003. – Т. 5116. – С. 136-148.
<https://doi.org/10.1117/12.497796>
31. Rigaud S., Quadri G., Gilard O., Nicot J.M. Optical MEMS reliability in space environment // Proc. SPIE. – 2006. – Т. 6186. – С. 221-232.
<https://doi.org/10.1117/12.661458>
32. Shea H.R. Reliability of MEMS for space applications // Proc. SPIE. – 2006. – Т. 6111. – С. 84-93. <https://doi.org/10.1117/12.651008>

33. Grönland T.A., Rangsten P., Nese M., Lang M. Miniaturization of components and systems for space using MEMS-technology // *Acta Astronautica*. – 2007. – Т. 61. – №. 1-6. – С. 228-233. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2007.01.029>
34. Jeong S.M., Nam S.U., Park I.H., Park J.H., Lee J. Lee C.H. Telescope with using MEMS mirror for detecting Gamma Ray burst // *The Bulletin of The Korean Astronomical Society*. – 2008. – Т. 33. – №. 1. – С. 44.2-44.2.
35. Park I.H. MEMS based space telescope for extreme energy cosmic rays experiments // *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*. – 2004. – Т. 134. – С. 196-201. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2004.08.031>
36. Gradov O.V., Gradova M.A., Maklakova I.A., Kholuiskaya S.N. Towards Electron-Beam-Driven Soft / Polymer Fiber Microrobotics for Vacuum Conditions // *Materials Research Proceedings*. – 2022. – Т. 21. – С. 370-383. <https://doi.org/10.21741/9781644901755-64>
37. Ford H.C., Clampin M., Illingworth G.D., Krist J.E., Olivier S.S., Petro L., Sommagren G.E. Requirements for an optical 8-m space telescope with a MEMs deformable mirror to detect Earth-like planets around nearby stars // *Proc. SPIE*. – 2003. – Т. 4854. – С. 554-557. <https://doi.org/10.1117/12.460052>
38. Park I.H., Artikova S., Kim J.E., Jeon J.A., Jeong S., Jung A., Lee H.Y., Lee J., Na G., Nam S., Oh S. MEMS Space Telescope Obscura: Pathfinder of Future Space Missions // *The Bulletin of The Korean Astronomical Society*. – 2007. – Т. 32. – №. 2. – С. 21.
39. Agrawal B., Kubby J. Applications of MEMS in segmented mirror space telescopes // *Proc. SPIE*. – 2011. – Т. 7931. – С. 9-25. <https://doi.org/10.1117/12.876503>
40. Miyamura N. Adaptive optics using a MEMS deformable mirror for a segmented mirror telescope // *Proc. SPIE*. – 2017. – Т. 10410. – С. 8-17. <https://doi.org/10.1117/12.2273868>
41. Li M.J., et al. MEMS microshutter arrays for James Webb Space Telescope // *Proc. SPIE*. – 2006. – Т. 6415. – С. 77-90. <https://doi.org/10.1117/12.706308>

42. Chen S., Sivanandam S., Moon D.S. Optical design of MEMS-based infrared multi-object spectrograph concept for the Gemini South Telescope // Proc. SPIE. – 2016. – T. 9908. – C. 2239-2249. <https://doi.org/10.1117/12.2230694>
43. Marinaro D.G., McMahon P., Wilson A. Proton radiation effects on MEMS silicon strain gauges // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2008. – T. 55. – №. 3. – C. 1714-1718. <https://doi.org/10.1109/TNS.2008.921933>
44. Gomes J., Shea H.R. Displacement damage effects in silicon MEMS at high proton doses // Proc. SPIE. – 2011. – T. 7928. – C. 126-135. <https://doi.org/10.1117/12.873546>
45. Bandi T., Polido-Gomes J., Neels A., Dommann A., Shea H.R. Making MEMS more suited for Space: Assessing the proton-radiation tolerance of structural materials for microsystems in orbit // Proc. SPIE. – 2013. – T. 8614. – C. 170-179. <https://doi.org/10.1117/12.2004705>
46. Patton S.T., Frasca A.J., Talnagi J.W., Hyman D.J., Phillips B.S., Jones J.G., Vaia R.A., Voevodin A.A. Effect of space radiation on the leakage current of MEMS insulators // IEEE transactions on nuclear science. – 2013. – T. 60. – №. 4. – C. 3074-3083. <https://doi.org/10.1109/TNS.2013.2263840>
47. Sallese J.M., Bouvet D. Principles of space-charge based bi-stable MEMS: The junction-MEMS // Sensors and Actuators A: Physical. – 2007. – T. 133. – №. 1. – C. 173-179. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.03.024>
48. Sawant A., Antonuk L.E., El-Mohri Y., Li Y., Su Z., Wang Y., Yamamoto J., Zhao Q., Du H., Daniel J., Street, R. Segmented phosphors: MEMS-based high quantum efficiency detectors for megavoltage X-ray imaging // Medical physics. – 2005. – T. 32. – №. 2. – C. 553-565. <https://doi.org/10.1118/1.1854774>
49. Riveros R.E., Yamaguchi H., Mitsuishi I., Takagi U., Ezoe Y., Kato F., Sugiyama S., Yamasaki N., Mitsuda K. Magnetic field assisted finishing of ultra-lightweight and high-resolution MEMS X-ray micro-pore optics // Proc. SPIE. – 2009. – T. 7360. – C. 315-322. <https://doi.org/10.1117/12.823961>

50. Mitsuishi I., Ezoe Y., Ishizu K., Moriyama T., Mita M., Yamasaki N.Y., Mitsuda K., Kanamori Y., Morishita K., Nakajima K. Novel ultra-lightweight and high-resolution MEMS X-ray optics for space astronomy // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2012. – T. 188. – C. 411-416. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.02.042>
51. Walko D.A., Jung I.W., Lopez D., Mukhopadhyay D., Schwartz C.P., Shenoy G.K., Wang J. Temporal modulation of synchrotron X-rays using torsional MEMS mirrors // *Proc. SPIE*. – 2012. – T. 8502. – C. 111-116. <https://doi.org/10.1117/12.930057>
52. Ishikawa K., Ezoe Y., Numazawa M., Ogawa T., Sato M., Nakamura K., Ohashi T., Mitsuda K., Maeda R., Hiroshima H., Kurashima Y. 12-inch X-ray optics based on MEMS process // *Microsystem Technologies*. – 2017. – T. 23. – C. 2815-2821. <https://doi.org/10.1007/s00542-016-2980-6>
53. Gilles J.P., Megherbi S., Raynaud G., Parrain F., Mathias H., Leroux X., Bosseboeuf A. Scanning electron microscopy for vacuum quality factor measurement of small-size MEMS resonators // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2008. – T. 145. – C. 187-193. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.11.026>
54. Zhang C., Zhao H., Xu S., Chen N., Li K., Jiang X., Liu L., Liu Z., Wang L., Wong K.K., Zou J. Multiscale high-speed photoacoustic microscopy based on free-space light transmission and a MEMS scanning mirror // *Optics Letters*. – 2020. – T. 45. – №. 15. – C. 4312-4315. <https://doi.org/10.1364/ol.397733>
55. Szentesi O.I. Stroboscopic electron mirror microscopy at frequencies up to 100 MHz // *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. – 1972. – T. 5. – №. 6. – C. 563-567. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/5/6/024>
56. Qiu J., Ha G., Jing C., Baryshev S.V., Reed B.W., Lau J.W., Zhu Y. GHz laser-free time-resolved transmission electron microscopy: A stroboscopic high-duty-cycle method // *Ultramicroscopy*. – 2016. – T. 161. – C. 130-136. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2015.11.006>

57. Jing C., Zhu Y., Liu A., Schliep K., Fu X., Zhao Y., Montgomery E., Rush W., Kanareykin A., Katz M., Lau J. Tunable electron beam pulser for picoseconds stroboscopic microscopy in transmission electron microscopes // *Ultramicroscopy*. – 2019. – Т. 207. – С. 112829. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2019.112829>
58. Bostanjoglo O., Rosin T. Ultrasonically induced magnetic reversals observed by stroboscopic electron microscopy // *Optica Acta: International Journal of Optics*. – 1977. – Т. 24. – №. 6. – С. 657-664. <https://doi.org/10.1080/713819603>
59. Schliep K.B., Katz M.B., Lau J.W. A RF Broadband Biasing Holder for Ultrafast Stroboscopic Electron Microscopy // *Microscopy and Microanalysis*. – 2018. – Т. 24. – №. S1. – С. 1852-1853. <https://doi.org/10.1017/S1431927618009741>
60. Vinoy K.J., Varadan V.K. Design of reconfigurable fractal antennas and RF-MEMS for space-based systems // *Smart materials and structures*. – 2001. – Т. 10. – №. 6. – С. 1211-1223.
61. Di Nardo S., Farinelli P., Kim T., Marcelli R., Margesin B., Paola E., Pochesci D., Vietzorreck L., Vitulli F. Design of RF MEMS based switch matrix for space applications // *Advances in Radio Science*. – 2013. – Т. 11. – С. 143-152. <https://doi.org/10.5194/ars-11-143-2013>
62. Lucibello A., Marcelli R., Proietti E., Bartolucci G., Mulloni V., Margesin B. Reliability of RF MEMS capacitive and ohmic switches for space redundancy configurations // *Microsystem Technologies*. – 2015. – Т. 21. – С. 1903-1913. <https://doi.org/10.1007/s00542-014-2124-9>
63. Savin E.A., Kirtaev R.V., Zhukov A.A., Didyk P.I. Design of a packaging-friendly double-topology RF MEMS switch for space applications // *Microsystem Technologies*. – 2019. – Т. 25. – №. 1. – С. 51-55. <https://doi.org/10.1007/s00542-018-3929-8>
64. Singh H., Malhotra J. RF-MEMS-Based DPDT Switch on Silicon Substrate for Ku-Band Space-Borne Applications // *Transactions on Electrical and Electronic Materials*. – 2017. – Т. 18. – №. 1. – С. 16-20. <https://doi.org/10.4313/TEEM.2017.18.1.16>

65. Hafiane A., Petitgrand S., Gigan O., Bouchafa S., Bosseboeuf A. Study of subpixel image processing algorithms for MEMS in-plane vibration measurements by stroboscopic microscopy // Proc. SPIE. – 2003. – T. 5145. – C. 169-179. <https://doi.org/10.1117/12.500141>
66. van Zeijl H.W., Simon K., Slabbekoorn J.H.C.M., Buel W.V., Gui C.Q. Waferstepper Alignment for MEMS Applications using Diffraction Gratings // MRS Online Proceedings Library. – 2002. – T. 729. – №. 1. – C. 58. <https://doi.org/10.1557/PROC-729-U5.8>
67. Day D.R. Multichannel gain equalizer MEMs surface topology effects on chromatic dispersion: a comparison of scalar diffraction modeling to actual product // Proc. SPIE. – 2004. – T. 5577. – C. 609-620. <https://doi.org/10.1117/12.567485>
68. Kim B., Schmittiel M.C., Degertekin F.L., Kurfess T.R. Actively controlled diffraction grating interferometer MEMS devices // Proc. SPIE. – 2005. – T. 5721. – C. 151-158. <https://doi.org/10.1117/12.592215>
69. Bicen B., Garcia C., Hall N.A., Okandan M., Cui W., Su Q.T., Miles R.N., Degertekin L. Diffraction based optical MEMS microphones and accelerometers with active electrostatic force feedback // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2008. – T. 123. – №. 5_Supplement. – C. 3230. <https://doi.org/10.1121/1.2933456>
70. Grabarnik S., Emadi A., Wu H., De Graaf G., Vdovin G., Wolffenbuttel R.F. Fabrication of an imaging diffraction grating for use in a MEMS-based optical microspectrograph // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2008. – T. 18. – №. 6. – C. 064006. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/18/6/064006>
71. Degertekin L., Jeelani K., Qureshi S., Hasler P., Bicen B., Cui W., Su Q.T., Miles R.N. Miniature diffraction - based optical MEMS microphones with integrated optoelectronics // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2008. – T.123. – №.5_Supplement. – C. 3229. <https://doi.org/10.1121/1.2933454>

72. Yu Y.T., Yuan W.Z., Qiao D.Y., Yan B. A simple numerical method to study the far-field diffraction of optical MEMS devices with a large array and complex element geometry // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2010. – T. 158. – №. 1. – C. 30-36. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.12.032>
73. Shtyrkova K., Arguello L., Oesch D., Sanchez D.J., Kelly P., Tewksbury-Christle C., Smith J. Experimental analysis of diffraction effects from a segmented MEMS deformable mirror for a closed loop adaptive optics system // *Proc. SPIE*. – 2010. – T. 7816. – C. 87-100. <https://doi.org/10.1117/12.861544>
74. Zhou G., Du Y., Cheo K.K., Chau F.S. MEMS-driven diffraction gratings for rapid scanning of laser beams with very high optical resolution // *Proc. SPIE*. – 2011. – T. 8191. – C. 35-44. <https://doi.org/10.1117/12.901076>
75. Zamkotsian F., Timotijevic B., Lockhart R., Stanley R.P., Lanzoni P., Luetzelschwab M., Canonica M., Noell W., Tormen M. Optical characterization of fully programmable MEMS diffraction gratings // *Optics Express*. – 2012. – T. 20. – №. 23. – C. 25267-25274. <https://doi.org/10.1364/OE.20.025267>
76. Suresh V.G., DasGupta N., Bhattacharya S. Tunable MEMS diffraction gratings // *Proc. SPIE*. – 2012. – T. 8549. – C. 252-257. <https://doi.org/10.1117/12.925113>
77. Long H., Xi S., Liu D., Shi T., Xia Q., Liu S., Tang Z. Tailoring diffraction-induced light distribution toward controllable fabrication of suspended C-MEMS // *Optics Express*. – 2012. – T. 20. – №. 15. – C. 17126-17135. <https://doi.org/10.1364/OE.20.017126>
78. Gloor S., Bachmann A.H., Epitoux M., von Niederhäusern T., Vorreau P., Matuschek N., Hsu K., Duelk M., Vélez C. High-speed miniaturized swept sources based on resonant MEMS mirrors and diffraction gratings // *Proc. SPIE*. – 2013. – T. 8571. – C. 283-289. <https://doi.org/10.1117/12.2007106>
79. Wang C., Lu Q., Bai J., Yang G., Wang K., Liu D., Yang Y. Highly sensitive lateral deformable optical MEMS displacement sensor: Anomalous diffraction studied by rigorous coupled-wave analysis // *Applied Optics*. – 2015. – T. 54. – №. 30. – C. 8935-8943. <https://doi.org/10.1364/AO.54.008935>

80. Reitterer J., Fidler F., Schmid G., Hambeck C., Saint Julien-Wallsee F., Leeb W., Schmid U. Beam-clipping-induced diffraction effects in MEMS laser scanners for autostereoscopic outdoor displays // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2015. – Т. 233. – С. 582-589. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.06.024>
81. Blanche P.A., LaComb L., Wang Y., Wu M.C. Diffraction-based optical switching with MEMS // *Applied Sciences*. – 2017. – Т. 7. – №. 4. – С. 411. <https://doi.org/10.3390/app7040411>
82. Suzuki Y., Tezuka S. Numerical simulation of 3D Fox–Li integral equation described by Rayleigh–Sommerfeld diffraction for MEMS-VCSEL // *Optical Review*. – 2019. – Т.26. – С.430-435. <https://doi.org/10.1007/s10043-019-00551-1>
83. Han S., Ishfaqe A., Phamduy P., Kim B. Effect of squeeze air film damping on diffraction grating based bio-inspired MEMS directional microphone // *Microsystem Technologies*. – 2020. – Т. 26. – С. 1203-1212. <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04650-6>
84. Ketchum R.S., Blanche P.A. Diffraction efficiency characteristics for MEMS-based phase-only spatial light modulator with nonlinear phase distribution // *Photonics*. – 2021. – Т. 8. – №. 3. – С. 62. <https://doi.org/10.3390/photonics8030062>
85. Apollonova I.A., Spiridonov I.N. Application of a optical Fourier processor for dermatoglyphical diagnostics // *Proc. SPIE*. – 1994. – Т. 2051. – С. 566-571. <https://doi.org/10.1117/12.165929>
86. Grudin B.N., Plotnikov V.S., Smol'yaninov N.A. Modeling images with specified fractal characteristics // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2010. – Т. 46. – С. 215-221. <https://doi.org/10.3103/S8756699010030027>
87. Grudin B.N., Plotnikov V.S., Smol'yaninov N.A., Polishchuk S.V. Simulation and reconstruction of nanosructure images in amorphous alloys // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2011. – Т. 75. – С. 1200-1204. <https://doi.org/10.3103/S1062873811090097>

88. Kraynova G.S., Frolov A.M., Pisarenko T.A. Fractal ordering nanostructured planar media // *Advanced Materials Research*. – 2013. – Т. 718. – С. 85-90.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.718-720.85>
89. Tkachev V.V., Kraynova G.S., Polyansky D.A., Plotnikov V.S., Dubinets A.V. Surface irregularities and magnetism in amorphous metal foils on Fe basis // *Solid State Phenomena*. – 2016. – Т. 245. – С. 223-229.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.245.223>
90. Frolov A.M., Ansovich A.V., Tkachev V.V., Kraynova G.S., Dolzhikov S.V. Surface morphology of spinning tapes Fe-(Cu, Nb)-(Si, B) with different content of metalloid // *Key Engineering Materials*. – 2019. – Т. 806. – С. 124-129.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.806.124>
91. Градов О.В. Корреляционно-спектральный анализ как метод квалитетрии материалов и горного сырья: ключевые дескрипторы структуры, интегральные частотные и пространственные характеристики и их динамика // *Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики*. – 2021. – С. 337-340.
92. Pustovalov E.V., Voitenko O.V., Grudin B.N., Plotnikov V.S. Graphics processors in problems of electron tomography // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2012. – Т. 48. – С. 62-68.
<https://doi.org/10.3103/S8756699012010098>
93. Sheromova I.A., Starkova G.P., Starkov S.V. Methods for the Structural Analysis of Highly Elastic Materials // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – Т. 459. – №. 6. – С. 062101. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/6/062101>
94. Горшенев В.Н., Градов О.В., Градова М.А. Дифференциальная ориентационная оценка структурных биомиметических свойств пористых тканеинженерных конструкций с использованием систем корреляционноспектрального анализа реального времени и математического аппарата теории морфизмов и (или) теории категорий // *Гены и Клетки*. – 2019. – Т. 14. – №. 5. – С. 68-69. <http://dx.doi.org/10.23868/gc122415>

95. Orekhov T.K., Gradov O.V. From desolvation-induced self-organization on the MALDI anchor target chip surfaces to laser-induced self-organization in MALDI techniques: Correlation-spectral analysis and complex wavelet analysis of tsiographic spots on the anchor chips // Materials Technology Reports. – 2023. – Т. 1. – №. 1. – С. 124. <https://doi.org/10.59400/mtr.v1i1.124>
96. Gradov O.V. Spectrozonol and multispectral raster lens-less microscopy of aquatic organisms: Towards new contact optical methods of environmental biotesting using standard model organisms in variable environments // Proc. SPIE. – 2024. – Т. 13279. – С. 499-505. <https://doi.org/10.1117/12.3041302>
97. Biryukov V.P., Prince A.N., Maklakova I.A., Gradov O.V. Metallographic DPSSL-assisted lens-less microscopy of Si-Al systems using a multiangle planar analyzer based on a polarizing microscope rotating table and a digital image correlator/2D FFT spectrometer // Proc. SPIE. – 2024. – Т. 13279. – С. 561-567. <https://doi.org/10.1117/12.3041314>
98. Градов О.В., Яблоков А.Г., Скрынник А.А. Периодиметр-регулометр для кинетического анализа символьных регистрограмм корреляционной стробоскопической электронной микроскопии и данных микрозондового химического картирования // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2017. – Т. 17. – №. 3. – С. 769-772.
99. Градов О.В., Александров П.Л., Градова М.А. Исследование образцов релевантных для пустынных местонахождений минералов методами программного корреляционно-спектрального анализа регистрограмм сканирующей электронной микроскопии: от 2D-Фурье-спектров до он-лайн-анализа статистики интегральных пространственных характеристик // Программные системы и вычислительные методы. – 2019. – №. 4. – С. 125-171. <https://doi.org/10.7256/2454-0714.2019.4.31379>

100. Градов О.В. Криоконвейерные протоколы в корреляционной световой и электронной микроскопии: от многоуровневой визуализации до моделирования биофизических эффектов и «криотераностики» // Вестник Московского университета. Серия 16. Биология. – 2023. – Т. 78. – №. 3S. – С. 57-62. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0952-16-78-3S-10>
101. Gradov O.V. Cryoconveyor Protocols in Correlative Light and Electron Microscopy: From Multilevel Imaging to Modeling the Biophysical Effects and “Cryotheranostics” // Moscow University Biological Sciences Bulletin. – 2023. – Т. 78. – №. Suppl 1. – С. S64-S68. <https://doi.org/10.3103/S0096392523700244>
102. Fishchenko V.K., Dolgikh G.I., Zimin P.S., Subote A.E. Some results of oceanological video monitoring // Doklady Earth Sciences. –2018. – Т. 482. – С. 1244-1247. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18090283>
103. Фищенко В.К., Зимин П.С., Зацерковный А.В., Гончарова А.А., Суботэ А.Е., Голик А.В. Стационарные системы подводного видеонаблюдения: возможности применения для мониторинга биоты прибрежных акваторий залива Петра Великого (Японское море) // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2018. – №. 1 (197). – С. 149-160.
104. Fischenko V.K., Goncharova A.A., Dolgikh G.I., Zimin P.S., Subote A.E., Klescheva N.A., Golik A.V. Express image and video analysis technology QAVIS: application in system for video monitoring of Peter the Great Bay (Sea of Japan/East Sea) // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – Т. 9. – №. 10. – С. 1073. <https://doi.org/10.3390/jmse9101073>
105. Долгих Г.И., Фищенко В.К., Гончарова А.А. О возможности регистрации волнения и колебаний уровня моря в прибрежных районах Мирового океана на основе анализа видео в сети Интернет // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 488. – №6. – С. 667-672. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524886667-672>

106. Фищенко В.К., Гончарова А.А., Зимин П.С. Применение систем стационарного подводного видеонаблюдения для оценивания параметров волнения и течений // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2019. – №. 8. – С. 230-237.
107. Долгих Г.И., Фищенко В.К., Гончарова А.А. О возможности регистрации волнения и колебаний уровня моря в прибрежных районах Мирового океана на основе анализа видео в сети Интернет // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 488. – №. 6. – С. 667-672.
108. Dolgikh G.I., Fishchenko V.K., Goncharova A.A. Potential for recording of waves and sea level fluctuations in the world ocean coastal areas by internet video analysis // Doklady Earth Sciences. – 2019. – Т. 488. – С. 1264-1267.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X19100209>
109. Зимин П.С., Фищенко В.К., Суботэ А.Е., Зацерковный А.В., Голик А.В. Разработка и апробация в бухте Алексеева (о. Попова) технологий регистрации волнения и колебаний уровня моря с использованием видеоволномеров // Физика геосфер. – 2019. – Вып. 11. – С. 53-64.
<https://doi.org/10.35976/POI.2019.25.50.005>
110. Фищенко В.К., Зимин П.С., Голик А.В., Гончарова А.А. Использование систем стационарного подводного видеонаблюдения для оценивания параметров подводных течений и морского волнения // Подводные исследования и робототехника. – 2020. – №. 2. – С. 62-73.
<https://doi.org/10.37102/24094609.2020.32.2.008>
111. Гончарова А.А., Фищенко В.К., Дубина В.А. Применение программы экспресс-анализа изображений и видео QAVIS в задачах спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9. – №. 3. – С. 293-298.
112. Митник Л.М., Кузлякина Ю.А. Ледяной покров залива Петра Великого на изображениях РСА PALSAR со спутника ALOS // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2013. – №. 6 (172). – С. 50-58.

113. Адамович Е.Д., Градов О.В., Насиров Ф.А. Жидкометаллическая микрофлюидика с морфометрическим корреляционно-спектральным контролем среды: от жидкометаллической антенны до радиочастотной осциллополярграфии // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 650–653. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.33474.63682>
114. Градов О.В., Насиров Ф.А., Яблоков А.Г. Безлинзовая гемоцитометрия на чипе со вторичным преобразованием сигналов / изображений клеток в рамках неканонической фотометрической модели // Фотоника. – 2018. – Т. 12. – № 7. – С. 716–729. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2018.12.7.716.729>
115. Knick C.R., Morris C.J. Material and process development of thin film shape memory alloy for MEMS actuator // Proc. ASME (American Society of Mechanical Engineers). – 2015. – Т. 57298. – С. V001T01A001. <https://doi.org/10.1115/SMASIS2015-8801>
116. Choudhary N., Kaur D. Shape memory alloy thin films and heterostructures for MEMS applications: A review // Sensors and Actuators A: Physical. – 2016. – Т. 242. – С. 162-181. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.02.026>
117. Zorman C.A., Mehregany M., Kahn H., Heuer A.H. New developments in MEMS using SiC and TiNi shape memory alloy materials // Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 1997. – Т. 2. – №. 5. – С. 566-570. [https://doi.org/10.1016/S1359-0286\(97\)80046-0](https://doi.org/10.1016/S1359-0286(97)80046-0)
118. Kahn H., Huff M.A., Heuer A.H. The TiNi shape-memory alloy and its applications for MEMS // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 1998. – Т. 8. – №. 3. – С. 213-221. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/8/3/007>
119. Gill J.J., Ho K., Carman G.P. The Fabrication of Thin Film NiTi Shape Memory Alloy Micro Actuator for MEMS Application // Proc. ASME (American Society of Mechanical Engineers). – 1999. – Т. 16424. – С. 125-131. <https://doi.org/10.1115/IMECE1999-0536>

120. Fu Y., Du H., Huang W., Huang X., Miao J., Liu Y. Preparation of crystalline TiNi shape-memory alloy thin film for MEMS applications // Proc. SPIE. – 2000. – T. 4230. – C. 140-146. <https://doi.org/10.1117/12.404895>
121. Fu Y., Huang W., Du H., Huang X., Tan J., Gao X. Characterization of TiNi shape-memory alloy thin films for MEMS applications // Surface and Coatings Technology. – 2001. – T. 145. – №. 1-3. – C. 107-112. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01324-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01324-X)
122. Du H., Fu Y. Characterization and MEMS application of sputtered TiNi shape memory alloy thin films // Proc. SPIE. – 2001. – T. 4601. – C. 138-146. <https://doi.org/10.1117/12.444686>
123. Fu Y., Du H. Magnetron sputtered TiNiCu shape memory alloy thin film for MEMS applications // Microsystems. – T. 9. – 2002. – C. 77-96. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5791-0_4
124. Lai B.K., Kahn H., Phillips S.M., Heuer A.H. A comparison of PZT-based and TiNi shape memory alloy-based MEMS microactuators // Ferroelectrics. – 2004. – T. 306. – №. 1. – C. 221-226. <https://doi.org/10.1080/00150190490460867>
125. Namazu T., Tashiro Y., Inoue S. Ti–Ni shape memory alloy film-actuated microstructures for a MEMS probe card // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2006. – T. 17. – №. 1. – C. 154. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/1/020>
126. Namazu T., Hashizume A., Inoue S. Thermomechanical tensile characterization of Ti–Ni shape memory alloy films for design of MEMS actuator // Sensors and Actuators A: Physical. – 2007. – T. 139. – №. 1-2. – C. 178-186. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.10.047>
127. Casati R., Vedani M., Tofail S.A., Dickinson C., Tuissi A. On the preparation and characterization of thin NiTi shape memory alloy wires for MEMS // Fracture and Structural Integrity. – 2013. – T. 7. – №. 23. – C. 7-12. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.23.01>

128. Knick C.R., Smith G.L., Morris C.J., Bruck H.A. Rapid and low power laser actuation of sputter-deposited NiTi shape memory alloy (SMA) MEMS thermal bimorph actuators // Sensors and Actuators A: Physical. – 2019. – Т. 291. – С. 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.03.016>
129. Фонгратовски С.В., Коледов В.В., Орлов А.П., Фроло А.В., Смолович А.М., Лега П.В., Шавров В.Г., Фам В.Ч., Иржак А.В., Пекизех Т. Бхатчатаррия С. Создание кольцевых и петлевых подвешенных структур на основе нанопроволок методом механической наносборки “снизу-вверх” // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – №. 2. – С. 1-9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.2.14>
130. Varadan V.K., Varadan V.V., Motojima S. Three-dimensional polymeric and ceramic MEMS and their applications // Proc. SPIE. – 1996. – Т. 2722. – С. 156-164. <https://doi.org/10.1117/12.240440>
131. Hossfeld J., Paatzsch T., Schulze J., Neumeier M., Weber L., Bauer H.D., Ehrfeld W. Polymeric optical MEMS // Proc. SPIE. – SPIE, 1999. – Т. 3680. – С. 637-645. <https://doi.org/10.1117/12.341256>
132. Ruben K.A., Flaim T.D., Li C. Polymeric protective coatings for MEMS wet-etch processes // Proc. SPIE. – SPIE, 2003. – Т. 5342. – С. 212-220. <https://doi.org/10.1117/12.523965>
133. Su Y.C., Lin L. Localized bonding processes for assembly and packaging of polymeric MEMS // IEEE Transactions on advanced packaging. – 2005. – Т. 28. – №. 4. – С. 635-642. <https://doi.org/10.1109/TADVP.2005.858333>
134. Bachmann D., Kuhne S., Hierold C. Fabrication process of polymeric springs for MEMS applications // The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005. Digest of Technical Papers. TRANSDUCERS'05. – IEEE, 2005. – Т. 2. – С. 1416-1419. <https://doi.org/10.1109/SENSOR.2005.1497347>
135. Zhong Z.W., Wang Z.F., Tan Y.H. Chemical mechanical polishing of polymeric materials for MEMS applications // Microelectronics Journal. – 2006. – Т. 37. – №. 4. – С. 295-301. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2005.05.016>

136. Lang U., Rust P., Dual J. Towards fully polymeric MEMS: Fabrication and testing of PEDOT/PSS strain gauges // *Microelectronic Engineering*. – 2008. – Т. 85. – №. 5-6. – С. 1050-1053. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2008.01.051>
137. Takahashi Y., Teh K.S., Lu Y.W. Fabrication and Characterization of Nano-Structuring Polymeric Surfaces for MEMS Applications // *Proc. ASME*. – 2008. – Т. 48746. – С. 209-213. <https://doi.org/10.1115/IMECE2008-68893>
138. Ozaydin-Ince G., Coclite A.M., Gleason K.K. CVD of polymeric thin films: applications in sensors, biotechnology, microelectronics/organic electronics, microfluidics, MEMS, composites and membranes // *Reports on Progress in Physics*. – 2011. – Т. 75. – №. 1. – С. 016501. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/1/016501>
139. Li K.H., Liu L.H., Wang P.C. Fabrication of robust polyaniline thin film electrodes on the surface of elastomeric poly (dimethylsiloxane) for polymeric MEMS applications // 2013 8th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT). – IEEE, 2013. – С. 330-333. <https://doi.org/10.1109/IMPACT.2013.6706680>
140. Pelegrini M.V., Pereyra I. Study of a-Si1-XCX: H Thin Films Obtained by PECVD in Temperatures Lower than 250° C Aiming Applications in Optics, Thin Films Devices on Polymeric Substrate and MEMS // *ECS Transactions*. – 2009. – Т. 23. – №. 1. – С. 127. <https://doi.org/10.1149/1.3183710>
141. Elias A.L., Harris K.D., Bastiaansen C.W., Broer D.J., Brett M.J. Polymeric helices with submicron dimensions for MEMS devices // *Proc. SPIE*. – 2005. – Т. 5836. – С. 41-55. <https://doi.org/10.1117/12.608584>
142. Diemeer M.B. J., Dekker R. Mems VOA with Polymeric Thermal Microactuators // 2002 28TH European Conference on Optical Communication. – IEEE, 2002. – Т. 3. – С. 1-2.
143. Lago H., Zakaria Z., Jamlos M.F., Soh P.J. A wideband reconfigurable folded planar dipole using MEMS and hybrid polymeric substrates // *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. – 2019. – Т. 99. – С. 347-353. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.12.011>

144. Bachmann D., Kuhne S., Hierold C. MEMS scanning mirror supported by soft polymeric springs and actuated by electrostatic charge separation // 2007 IEEE 20th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). – IEEE, 2007. – C. 723-726. <https://doi.org/10.1109/MEMSYS.2007.4433088>
145. Rathna K., Haji-Saeed B., Pyburn D., Leon R., Sengupta S.K., Testorf M., Goodhue W., Khoury J., Drehman A., Woods C.L., Kierstead J. Photoconductive Optically Driven MEMS Spatial Light Modulator utilizing a GaAs Substrate and Polymeric Membrane Mirror // Frontiers in Optics. – Optica Publishing Group, 2003. – C. TuV5. <https://doi.org/10.1364/FIO.2003.TuV5>
146. Demir M.M., Naseer M., Bechteler T.F., Gurbuz Y., Menciloglu Y.Z. Polyurethane nanofiber webs for sensor and actuator applications in microelectromechanical systems (MEMS) // MRS Online Proceedings Library (OPL). – 2003. – T. 782. – C. A5. 29.
147. Burianskaya E.L., Gradov O.V., Gradova M.A., Iordanskii A.L., Kochervinskii V.V., Maklakova I.A., Olkhov A.A., Ratnovskaya A.V. Time-resolved estimation of multifractal spectra of ferroelectric/piezoelectric polymer dynamics and neuromimetic fiber orientation: Towards electric-field- and electron-beam-controllable scaffolds and tissue-engineering constructs with dynamic beads // Advanced Structured Materials. – 2025. – Vol. 221. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-75626-9_6
148. Zhang Y., Wesolowski M., Karakatsani A., Witzemann V., Kröger S. Formation of cholinergic synapse-like specializations at developing murine muscle spindles // Developmental biology. – 2014. – T. 393. – №. 2. – C. 227-235. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2014.07.011>
149. Higashida H., Furuya S. Cholinergic synapse formation between NG108-15 and muscle cells and modulation of transmission // Neuroscience Research Supplements. – 1990. – T. 13. – C. S75-S79. [https://doi.org/10.1016/0921-8696\(90\)90034-Z](https://doi.org/10.1016/0921-8696(90)90034-Z)

150. Malomouzh A.I., Nikolsky E.E. Modern concepts of cholinergic neurotransmission at the motor synapse // Biochemistry (Moscow), Supplement Series A: Membrane and Cell Biology. – 2018. – Т. 12. – С. 209-222.
<https://doi.org/10.1134/S1990747818030078>
151. Singh R.A., Yoon E.S., Kim H.J., Kong H., Jeong H.E., Suh K.Y. Submicron-scale Polymeric Patterns for Tribological Application in MEMS/NEMS // KSTLE International journal. – 2005. – Т. 6. – №. 2. – С. 33-38.

Для цитирования:

Александров П.Л., Бурьянская Е.Л., Градов О.В., Иорданский А.Л., Маклакова И.А., Ольхов А.А., Ратновская А.В., Холуйская С.Н. На пути к созданию управляемых электронным пучком (опто)волоконных микроэлектромеханических систем на базе пьезоэлектрических и сегнетоэлектрических полимеров и композитов // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 8.
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.8.1>