

# Пленарная часть Российского форума «Микроэлектроника 2023»

## Часть 2

Ю. Ковалевский



Пленарная часть Российского форума «Микроэлектроника 2023», проходившего с 9 по 14 октября 2023 года в Парке науки и искусства федеральной территории «Сириус», включала в себя четыре заседания, на которых обсуждались как вопросы развития отрасли в целом, так и достижения и планы по отдельным актуальным направлениям. Во второй части статьи рассматриваются доклады, представленные на двух пленарных заседаниях форума, которые были посвящены вопросам доверенности электронных систем и программно-аппаратных комплексов (ПАК) для критической информационной инфраструктуры (КИИ) и развитию ЭКБ, алгоритмов и технологий для реализации искусственного и гибридного интеллекта.

### ДОВЕРЕННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПАК ДЛЯ КРИТИЧЕСКОЙ ГРАЖДАНСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Хотя в названии второго пленарного заседания Российского форума «Микроэлектроника 2023» акцент делался на электронные системы и ПАК для КИИ, обсуждаемые темы касались вопросов доверия и доверенности в более широком спектре приложений.

Заседание началось с вводного доклада его модератора – **заместителя директора Центра экстремальной прикладной электроники НИЯУ МИФИ А. Ю. Никифорова**. Докладчик, в частности, напомнил аудитории о хронологии событий последнего времени в области обсуждения и принятия решений по вопросам, связанным с тематикой заседания. Так, одной из важнейших вех было названо подписание весной прошлого года Указа Президента РФ



от 30 марта 2022 года №166 «О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации». Также было отмечено, что Росстандартом в декабре 2022 года был создан технический комитет по стандартизации «Программно-аппаратные комплексы для критической инфор-

мационной инфраструктуры и программное обеспечение для них» (ТК 167), в рамках которого было разработано три проекта предварительных национальных стандартов в области КИИ – по терминологии, доверенным ПАК и доверенным ИМС и электронным модулям соответственно.

А. Ю. Никифоров привел и прокомментировал ряд определений терминов, применяемых в проектах стандартов. Он особо указал на различие понятий «доверенность» и «доверие», первое из которых означает объективное свойство объекта, а второе – напротив, является субъективным, зависящим от отношения к объекту потребителя. Также было отмечено различие между часто смешиваемыми понятиями технологической безопасности, которая носит технический характер, и технологической независимости, являющейся политическим понятием. Кроме того, А. Ю. Никифоров высказал тезис о том, что подчас отождествляются понятия доверенности и отечественности, тогда как доверенное изделие совершенно не обязательно является отечественным, как и отечественное – доверенным.

Обозначив таким образом терминологическое поле для дальнейшей дискуссии, модератор заседания передал слово **руководителю проектного офиса «Критическая информационная инфраструктура» ГК «Росатом» К. А. Смазнову.**

Описав в начале своего доклада регуляторный ландшафт в сфере КИИ, К. А. Смазнов рассказал о разработке Основ государственной политики в области обеспечения безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации. Было



отмечено, что в данном документе определены основные риски и направления развития, при этом разработка доверенных ПАК и их компонентов – это только «вершина айсберга». Для комплексного решения задач по обеспечению технологической независимости необходимо реализовывать комплекс взаимосвязанных мероприятий по доработке прикладного ПО под российские архитектуры центральных процессоров, созданию отечественного репозитория доверенных программных пакетов и библиотек, разработке доверенной среды проектирования ключевых компонентов ПАК и аппаратуры, развитию прорывных перспективных технологий, созданию отдельной системы сертификации доверенной продукции, поддержке субъектов КИИ при внедрении разработанной доверенной продукции, разработке комплекса документов по стандартизации и т. д. Данные задачи планируется отразить в документе по реализации основ госполитики.

Также К. А. Смазнов познакомил аудиторию с деятельностью ГК «Росатом» в целом и АО «НПО «КИС», созданным в рамках корпорации в соответствии с Указом Президента РФ от 30 марта 2022 года №166, в частности, в области организации разработки и внедрения доверенных программно-аппаратных комплексов (ДПАК). Так, было сказано, что в ГК «Росатом» организована работа по созданию линейки ДПАК; выпущен аппаратный модуль доверенной загрузки на отечественной ЭКБ; на Курской АЭС внедрена первая доверенная система диспетчеризации; сформирована кооперация, включающая 22 предприятия ГК «Росатом» и направленная на развитие производства ДПАК; подготовлены заявки в части НИОКР на разработку ДПАК и их компонентов в соответствии с постановлениями Правительства РФ от 17 февраля 2016 года №109 и от 24 июля 2021 года №1252.

В докладе прозвучала информация о том, что атомная отрасль определена пилотной для апробирования основных научно-технических, организационных и нормативных подходов к переходу субъектов КИИ на ДПАК. Для этого в данной отрасли реализуется пилотный проект; организованы пилотные полигоны; выпущены отраслевые требования к технологической независимости продукции для КИИ; определено 28 требований к ее производителям, из которых 11 являются обязательными; создан прототип информационной системы для управления жизненным циклом продукции для КИИ.

Среди планов дальнейшей реализации пилотного проекта было названо, в частности, тиражирование полученных результатов на другие отрасли, в том числе космическую.

В завершение доклада К. А. Смазнов отметил, что в основе экосистемы обеспечения КИИ доверенными ПАК, ПО и ЭКБ должен быть качественный, удобный, безопасный и доверенный цифровой сервис, который объединит на

своей площадке всех участников процесса, среди которых органы государственной власти, отраслевые регуляторы, разработчики и поставщики ДПАК, научные организации и вузы, субъекты КИИ. Докладчик подчеркнул, что эта работа начата и, безусловно, будет доведена до конца.



Следующим прозвучал доклад **старшего управляющего директора – директора департамента «Сбер» (ПАО Сбербанк) К. Р. Карапетяна**. Докладчик отметил, что «Сбер» является одним из крупнейших операторов КИИ и в полном объеме решает те непростые задачи, которые стоят перед операторами по обеспечению технологической

независимости, безопасности и устойчивости инфраструктуры. Он сообщил, что по направлению импортозамещения и кибербезопасности более 95% решений в компании переведены на отечественные рельсы. Компания разрабатывает и внедряет свою собственную облачную платформу для разработки бизнес-решений – Platform V.

Говоря о применении искусственного интеллекта, докладчик отметил, что, согласно ряду аналитических обзоров, уже к 2026 году оборудование, которое будет работать на ИИ, составит не менее 50% от всей ИТ-инфраструктуры в мире. Примерно такое же соотношение, по оценке компании, будет и в инфраструктуре «Сбера».

Также К. Р. Карапетян рассказал о некоторых преимуществах созданного в кооперации с отечественными разработчиками серверного оборудования – ключевого компонента инфраструктуры «Сбера», и познакомил аудиторию с основными этапами пути, по которому идет компания в направлении импортозамещения и обеспечения доверенности. Начался этот путь с разработки собственной платформы и постепенного отказа от вендорского оборудования. Следующий этап, на котором сейчас находится компания, – переход на собственное системное ПО, оборудование и ПАК. Далее планируется создание комплексов, которые могут быть тиражированы в качестве стандартных элементов для построения инфраструктуры необходимого масштаба в любом месте, в том числе у клиентов.

Докладчик отметил, что компания открыта к сотрудничеству с разработчиками и производителями электроники, проявляет интерес к вертикально-интегрированным решениям и заинтересована в том, чтобы понимать, как устроен весь технологический стек.

**Начальник департамента квантовых коммуникаций ОАО «РЖД» А. В. Глейм** сосредоточился в своем докладе на одном из компонентов доверенности – вопросах телекоммуникационных каналов как основы для безопасной и доверенной инфраструктуры, рассказав о деятельности компании в области квантовых коммуникаций.



Он отметил, что данное направление активно развивается в мире. Недавно Китай впервые поставил вопрос о создании телекоммуникационного сервиса на квантовой основе, что радикально изменило рынок квантовых коммуникаций. На коммерческом рынке уже доступны клиентские устройства – в частности, от компании Samsung. В ЕС запущен проект по формированию единой сетевой инфраструктуры для предоставления соответствующих сервисов.

В России данное направление отражено в новом национальном проекте «Экономика данных». Между ОАО «РЖД» и Правительством РФ было заключено обновленное соглашение по реализации дорожной карты по направлению квантовых коммуникаций. Согласно дорожной карте, к 2024 году должно быть реализовано 7 тыс. км квантовых сетей, а в соответствии с обновленным документом – 15 тыс. км магистральной инфраструктуры до 2030 года. Также в документе определено 17 ключевых групп продуктов по приоритетным технологиям, находящимся на разных стадиях развития.

В качестве одного из важных проектов по внедрению и расширению инфраструктуры докладчик выделил проект межвузовской сети, развитие которого активно ведется совместно с Минобрнауки России.

А. В. Глейм рассказал, что в ОАО «РЖД» квантовые коммуникации встраиваются не только в сервисы по обмену данными между ЦОД, но и в технологические процессы. В качестве примера был приведен проект беспилотного поезда «Ласточка», где применение квантовых технологий для автоматизации процессов, связанных с криптографической защитой, и обслуживания соответствующей инфраструктуры в комплексе с другими сервисами может дать существенный эффект, в том числе экономический.

Кроме того, докладчик уделил внимание импортозамещению компонентов, выстраиванию цепочек кооперации, стандартизации и нормативному регулированию и другим вопросам в сфере квантовых коммуникаций, отметив, что в этой области существует большое поле для совместной работы с отраслью микроэлектроники.





**Д. П. Зегжда, директор Института компьютерных наук и кибербезопасности СПбПУ,** в своем выступлении указал на актуальность доверенности в современном мире, в частности отметив, что процесс цифровизации, с одной стороны, активно движется вперед, а с другой – наталкивается на проблемы надежности и безопасности. По

его словам, источником самой страшной угрозы – кибератак – являются свойства самой системы, а именно ошибки, уязвимости, недокументированные возможности. Таким образом, кибератаки породили проблему недоверия к продуктам.

Также докладчик предложил оценивать доверенность системы на основе снижения меры неопределенности функционирования, достигаемого за счет экспериментальных исследований и получения практически подтвержденной информации об алгоритмах ее функционирования. В этих терминах задача обеспечения доверенности может рассматриваться как задача снижения энтропии. Исходя из этого, были предложены формальные критерии доверенности.

В качестве экспериментального подхода для оценки доверенности были рассмотрены киберполигоны – среды, которые полностью эмулируют функционирование системы в реальной среде и могут быть использованы для поиска уязвимостей, оценки эффективности мер противодействия атакам и снижения меры неопределенности.



**И. Г. Анцев, исполнительный директор АО «НПП «Радар ммс»,** посвятил свой доклад критическим технологиям беспилотных авиационных систем. Он отметил, что применение БПЛА в гражданской сфере вышло на национальный уровень: утвержден национальный проект по развитию беспилотных авиационных систем. Докладчик привел данные, показывающие, что этот рынок весьма масштабный и в нем есть

очень большой потенциал для развития электроники.

Отдельно было указано на то, что ранее затраты на сертифициацию одного беспилотного аппарата в комплексе

составляли около 500 млн руб., что было неподъемной суммой для подавляющего большинства компаний, однако за последнее время в этой области произошли существенные изменения в лучшую сторону. Также было отмечено, что в рамках национального проекта, по сути, принята идеология сквозных проектов, что означает, что при постановке работ по созданию беспилотных систем запускается целый спектр НИОКР по созданию критических комплектующих для данных систем.

Подчеркнув важность доверенности БПЛА как фактора безопасности его функционирования, И. Г. Анцев указал на то, что для ее обеспечения необходимо, чтобы составляющие его компоненты и ПО также были доверенными. При этом необходимо проделать большую работу по созданию электронных блоков управления двигателями, контроллеров сервоприводов, инерциальных систем, систем технического зрения и других систем и устройств на отечественной ЭКБ, а также по развитию наземной инфраструктуры для обеспечения функционирования БПЛА в автоматическом режиме, без непосредственного управления оператором.

Кроме того, в докладе было уделено внимание вопросам доверенности в отношении применения ИИ и навигации БПЛА.



**Ректор НИЯУ МИФИ В. И. Шевченко** начал свой доклад с понятий доверия и доверенности, присоединившись к словам А. Ю. Никифорова о том, что между этими понятиями нельзя ставить знак тождества. Он отметил, что существует возможность совершить методологическую ошибку, приняв как само собой разумеющееся, что между

доверием и доверенностью есть прямая корреляция. Если потребителю предлагается продукт определенной подтвержденной категории доверенности, это не значит, что он будет ему доверять. Также докладчик указал на то, что, говоря о доверенности электронных систем, нельзя исключать ни одного звена, поэтому должны рассматриваться все составляющие элементы – компоненты, библиотеки СФ-блоков, средства разработки и т. п., включая в том числе и кадры.

Основная часть доклада была посвящена деятельности и возможностям МИФИ в сфере подготовки кадров для микроэлектронной отрасли, а также в области обеспечения доверенности электронных систем. Были приведены соответствующие направления, по которым готовит

специалистов данный вуз. Также прозвучала информация о том, что в университете формируется так называемый доверенный кластер, в рамках которого, помимо развития КМОП-технологий, ведутся исследования, направленные на переход функциональной электроники на компандные полупроводники, в частности на платформу фосфида индия. Докладчик подчеркнул, что внутри кластера все компоненты, такие как реверс-инжиниринг, технологии, разработка, тестирование, неразрывно связаны с образовательным процессом.

Также было сказано, что в университете создается один из шести R&D-центров в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» и действуют четыре научно-исследовательских центра в сфере информационной безопасности и доверенных электронных систем. Докладчик привел и другую информацию о деятельности МИФИ, в частности в области контроля радиационной стойкости ЭКБ.

В. И. Шевченко завершил свое выступление тезисом о необходимости создания системы независимых экспертных испытательных центров в области обеспечения и контроля доверенности, при этом отметив, что НИЯУ МИФИ претендует на то, чтобы стать одним из них.

Доклад **генерального директора АО «НИИМА «Прогресс» З. К. Кондрашова** был посвящен вопросам развития координатно-временного навигационного обеспечения. По его словам, учитывая масштаб и развитость транспортной инфраструктуры России, сейчас необходим комплексный подход в данной области, включающий построение целых систем навигационного обеспечения потребителей и их интеграцию в систему управления техникой и робототехническими комплексами. Основу навигационных систем сегодня составляют глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), которые становятся всё точнее и надежнее, а построение на их базе современных систем и комплексов еще больше расширяет возможности их применения, обеспечивает доверие к создаваемой системе навигационной безопасности и ее функциональность. Одним из наиболее перспективных направлений такой интеграции является комплексирование различных ГНСС, но для повышения точности, доступности и непрерывности, которые могут быть нарушены из-за помех, маневрирования, затенения сигналов и т. д.,



ГНСС совмещаются также с инерциальными и локальными наземными радионавигационными системами.

Докладчик привел доводы в пользу необходимости создания единого навигационного поля на территории РФ и прилегающих акваториях и обрисовал возможный облик такой системы. При этом было отмечено, что создание навигационной аппаратуры нового уровня должно сопровождаться разработкой универсальной ЭКБ, позволяющей разработчикам аппаратуры сосредоточиться на обработке сигналов и методах повышения точности, целостности и доступности.

З. К. Кондрашов сообщил, что институтом планируется разработка универсальной SDR-платформы, способной принимать и обрабатывать сигналы всех известных радионавигационных систем, что станет базой для разработки семейства помехоустойчивых ИМС, позволяющих создавать навигационную аппаратуру, способную работать в том числе в сложной помеховой обстановке. Эта работа будет первым шагом на пути создания универсальной навигационной СБИС и позволит отработать основные принципы работы платформы.

В завершение заседания состоялась дискуссия, в рамках которой, в частности, выступили **генеральный директор АО «ПКК Миландр» А. Ю. Новосёлов** и **генеральный директор АО «НИИЭТ» П. П. Куцько** по вопросам применения отечественной ЭКБ в гражданской продукции и доверия со стороны рынка и отрасли в отношении такого применения.

### ИСКУССТВЕННЫЙ И ГИБРИДНЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ: ЭКБ НА НОВЫХ ПРИНЦИПАХ, АЛГОРИТМЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ

Третье пленарное заседание форума было посвящено различным аспектам направления искусственного интеллекта – от физической реализации специализированной ЭКБ и развития алгоритмов до практических решений, а также совмещения микроэлектроники и живых нейронных сетей.



После вводных слов модераторов заседания, которыми выступили **начальник отдела перспективных исследований АО «НИИМЭ» О. А. Тельминов** и **руководитель Курчатовского комплекса НБИКС-технологий НИЦ «Курчатовский институт» В. А. Дёмин**, был представлен доклад **директора центра технологического партнерства и развития технологических партнерств «Сбер» (ПАО Сбербанк) С. А. Белоусова**, озаглавленный «Основные тренды в микроэлектронике для поддержки искусственного интеллекта».

Докладчик сообщил, что «Сбер» разрабатывает технологии на основе ИИ и продолжает инвестировать в это направление. В частности, такие продукты компании, как GigaChat и Kandinsky, успешно конкурируют с ведущими решениями от глобальных игроков.



С. А. Белоусов рассказал о текущих направлениях в области нейросетей в мире, отметив новый тренд на развитие нейросетей типа Vision Transformer (ViT), и указал на то, что вследствие роста количества используемых в нейросетях параметров, увеличения обрабатываемых объемов данных и повышения требований к быстродействию вычислительных устройств производители электроники вынуждены также развивать свои технологические процессы.

Был отмечен и тренд на замену классических архитектур на основе традиционной памяти, например DRAM, на память новых типов, таких как HBM, которая благодаря расположению вблизи вычислительных блоков будет обладать более высокой пропускной способностью. Также ожидается, что за счет применения 3D-компоновки будут появляться стеки памяти большего объема.

Другим интересным направлением, в котором работают в том числе ведущие производители памяти, является технология вычислений в памяти (in-memory computation). Однако, хотя это решение позволяет значительно повысить пропускную способность, у него есть ряд ограничений, связанных прежде всего с проблемами масштабирования кристаллов.

Для преодоления встающих перед разработчиками решений для ИИ проблем ведущие мировые компании рассматривают новые технологии, среди которых – технология чиплетов. Ожидается, что к 2026 году 100% всех серверных процессоров будут выполнены с применением данной технологии.

Также докладчик рассказал о тенденциях в протоколах обмена данными. Так, для высокоскоростного интерфейса между отдельными блоками в сборке на основе чиплетов в прошлом году был анонсирован стандарт консорциума UCle, который был поддержан такими компаниями, как Intel, Microsoft, Nvidia и др. Данный стандарт построен на базе PCIe.

Стандарт CXL – ответвление от PCIe – открывает интересные возможности для разработчиков аппаратуры для ЦОД. По словам С. А. Белоусова, есть основания полагать, что в будущем отдельные блоки и стойки будут связаны с помощью данного протокола.

В отношении высокоскоростного интерфейса между отдельными стойками, который требуется для задач большого масштаба, взгляд отрасли направлен в сторону оптики, а с учетом развития технологии чиплетов можно предположить, что оптические модули будут размещаться всё ближе и ближе к вычислительным ядрам, результатом чего в конечном счете станет сложная гетерогенная структура, включающая оптические модули.



**Профессор кафедры нейротехнологий Института биологии и биомедицины ННГУ имени Н. И. Лобачевского и директор Института фундаментальной медицины Приволжского исследовательского медицинского университета И. В. Мухина** посвятила свой доклад нейрогибридным технологиям – взаимодействию микроэлектроники и жи-

вой системы. Она рассказала о некоторых современных научных представлениях о работе мозга, среди которых – зависимость интеллектуальных способностей организма от специализации нейронных сетей. Также были приведены некоторые особенности нейронных сетей живого мозга, которые пока не могут быть представлены в свойствах материалов или вычислительных алгоритмах, включая способность нейронов в составе сетей адаптировать свою функцию к свойствам среды, внеклеточному матриксу мозга и их взаимодействие с клетками других типов, например с астроцитами и микроглией.

Профессор поделилась с аудиторией некоторыми результатами работ нижегородских ученых в области выращивания живых нейронных сетей на микроэлектронных чипах. Одним из последних результатов было создание структуры из двух сетей – «источника» и «приемника», соединенных однонаправленной связью, которая была выращена с помощью микрофлюидных технологий.



Было отмечено, что данная технология позволяет строить структуры с различным количеством иерархических связей, что приближает их к тем, которые существуют в живом мозге, и эту систему уже можно считать моделью «мозг-на-чипе». Далее планируется решить задачу создания *in vitro* нейронной сети с обратной связью, что еще более приблизит ее к структуре реального мозга.

В докладе также были приведены задачи, которые можно будет решать с помощью модели «мозг-на-чипе». Среди них – изучение работы живых нейронных сетей для дальнейшего использования результатов при создании искусственных интеллектуальных систем, а также возможности взаимодействия микроэлектронных и биологических систем; моделирование регенерации тканей мозга; изучение механизмов нейродегенеративных заболеваний, скрининг новых нейротропных лекарственных препаратов.



**Заведующий отделом нелинейной динамики ИПФ РАН В. И. Некоркин** в своем онлайн-докладе, озаглавленном «Нелинейная динамика и машинное обучение в задачах вычислительной нейронауки», сосредоточился преимущественно на рекуррентных нейросетях. Приведя примеры таких нейросетей и рассказав об областях их применения, он сообщил о результатах ряда работ, проведенных в отделе, по решению различных задач с их использованием. Были исследованы динамические механизмы генерации рекуррентной нейросетью автономных и вызванных внешним стимулом пространственно-временных паттернов в виде последовательных активаций выходных нейронов. Кроме того, была построена нейронная сеть, способная генерировать более сложные паттерны, включая мультикластерные и химерные состояния. В результате машинного обучения в фазовом пространстве нейросети формируются инвариантные множества, отвечающие целевым режимам коллективной активности. При этом были выявлены закономерности поведения отдельных нейронов и их групп. Наконец, была проведена работа, в которой рекуррентная нейросеть спайковых нейронов решала несколько целевых задач когнитивной нейронауки. При анализе

фазового пространства данной системы было показано, что в нем можно выделить траектории, отвечающие за различные аспекты решаемых целевых задач. Была установлена структура связей после обучения и выявлено образование специализированных функциональных кластеров.

Докладчик выразил мнение, что на основе рекуррентных нейросетей, предмет изучения которых лежит на пересечении таких областей, как машинное обучение, нейронаука и теория динамических систем, является реалистичным построение сильного ИИ.

**Профессор кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Н. В. Андреева** представила доклад по многоуровневым мемристорным структурам для когнитивных вычислений. Она рассказала, что в области аппаратной реализации нейросетевых архитектур существуют два основных направления: первое подразумевает исполнение алгоритмов

глубоких нейронных сетей, для которого наряду с традиционными компьютерными системами используются ускорители искусственного интеллекта на базе вычислений в памяти; второе ориентировано на эмуляцию биологически реалистичных спайковых (или импульсных) нейронных сетей и на сегодняшний день представлено в своем большинстве узкоспециализированными архитектурами нейронных сетей прямого распространения для обработки информации в смарт-устройствах. Важным преимуществом последнего направления является то, что соответствующие алгоритмы дискретны во времени, и их исполнение позволяет дополнительно повысить энергоэффективность расчетов в сравнении с аппаратной реализацией глубоких нейросетей. Было отмечено, что переход от классической к тайловой архитектуре (с использованием вычислений в памяти) в ускорителях искусственного интеллекта даже при КМОП-реализации позволяет повысить энергоэффективность вычислителей на порядок, а при переходе к новой, мемристорной ЭКБ – намного больше.

Н. В. Андреева указала на то, что в настоящее время можно выделить шесть классов многоуровневых мемристорных структур:

- электрооптический мемристор на основе памяти с фазовым переходом;
- сегнетоэлектрический транзистор;
- интеркалированный резистор;



- синаптический транзистор (полевой транзистор с инжектирующим затвором);
- мемристор на основе твердых электролитов;
- металлооксидный мемристор.

Недостатком мемристоров первых четырех классов является то, что они представляют собой трехтерминальные устройства, в то время как два последних класса являются двухполюсниками, которые при этом хорошо интегрируются в BEOL-процесс КМОП-технологии в структуре кроссбар-массивов. Было высказано мнение, что сейчас, при прочих сравнимых характеристиках по энергопотреблению, количеству циклов переключения и сохранению промежуточных резистивных уровней, удобство КМОП-интеграции является основным преимуществом металлооксидных (OxRAM) структур.

Рассказав о физических механизмах резистивной перестройки в данных структурах, которые в общем случае можно разделить на филаментарные и нефиламентарные, их характеристиках и мировых достижениях в данной области, Н. В. Андреева поделилась с аудиторией результатами, полученными в СПбГЭТУ «ЛЭТИ». В частности, она сообщила о разработанных структурах на базе последовательности слоев оксидов титана и алюминия, в которых образование локальной проводящей области происходит за счет того, что при нанесении пленки диоксида титана на платину в узком технологическом окне синтеза образуется наноразмерная фаза анатаза с нехарактерным для нее р-типом проводимости, позволяющая обратно менять резистивные свойства слоя оксида алюминия и, более того, приводящая к образованию гетероперехода на интерфейсе со вторым оксидным слоем, что облегчает многоуровневую перестройку в достаточно широком диапазоне на уровне семи порядков по значению.

Также был предложен дизайн многоуровневых мемристивных устройств с нефиламентарным типом переключения на базе тонких поликристаллических сегнетоэлектрических пленок титаната бария. Было обнаружено, что механизмы транспорта в таких пленках схожи с наблюдаемыми для металлооксидных мемристоров. Была разработана диффузионно-дрейфовая модель нестационарных процессов, с помощью которой были получены распределения кислородных вакансий по толщине тонкой сегнетоэлектрической пленки для разных значений их подвижности, и показано, что проявление аналогового режима перестройки резистивного состояния в таких структурах определяется подвижностью кислородных вакансий. В этом случае для увеличения диапазона аналоговой перестройки требуется создание асимметричных структур с выпрямляющим контактом на одном из интерфейсов мемристивного слоя.

Далее Н. В. Андреева рассказала о причинах и разрабатываемых методах коррекции вариабельности параметров переключения мемристоров от устройства

к устройству и от цикла к циклу, являющейся основной трудностью при интеграции мемристивных структур в аппаратную часть. Кроме того, были приведены рекомендации, которые следует учесть при использовании многоуровневых мемристивных структур в архитектурах нейросетей, и описаны пять основных этапов интеграции многоуровневой мемристивной логики в аппаратную архитектуру нейроморфных устройств:

- разложение сети на граф;
- учет влияния количества доступных уровней проводимости и особенностей резистивной перестройки на процесс обучения нейросети;
- оптимизация архитектуры импульсных нейронных сетей с целью снижения ее энергопотребления;
- разработка компактных моделей многоуровневых мемристивных структур;
- аппаратно-интегральное проектирование нейронных сетей на базе многоуровневой мемристивной логики.

В качестве заключения, в частности, было отмечено, что группой предложен вариант структуры, который, исходя из физических принципов, должен существенно снизить вариабельность рабочих параметров при повышении стабильности и организации требуемого количества промежуточных резистивных состояний.

**В докладе С. А. Щаникова, старшего научного сотрудника лаборатории физики и технологии тонких пленок отдела твердотельной электроники и оптоэлектроники Научно-исследовательского физико-технического института ННГУ имени Н. И. Лобачевского,** был,



в частности, представлен обзор нейроморфных вычислительных систем на основе КМОП-интегрированных мемристивных матриц. Было отмечено, что на базе мемристоров уже продемонстрирована возможность реализации основных архитектур искусственных нейронных сетей, таких как перцептрон, сверточные, рекуррентные, спайковые и др. Также продемонстрированы различные виды обучения, включая обучение с подкреплением и самообучение.

По словам докладчика, существуют два подхода к формированию синапса на базе мемристоров – дискретный и аналоговый, причем второй является более перспективным направлением. Он применяется в спайковых нейросетях, где вес характеризуется формой кривой



зависимости от времени прихода спайков. Этот формат похож на биологическую характеристику, называемую пластичностью. Таким образом, с помощью мемристоров можно реализовывать не только формальные, но и более биоподобные сети.

Докладчик привел таблицу с характеристиками большинства современных прототипов нейроморфных систем на базе мемристоров. Все представленные системы являются КМОП-совместимыми, количество ячеек варьируется от 1 тыс. до 4 млн; размеры кроссбара – от 16×16 до 1024×512. Все представленные прототипы тестировались на стандартных наборах данных для распознавания рукописных цифр и изображений из библиотек CIFAR. При этом виден тренд, заключающийся в том, что нейросети, реализованные на основе мемристоров, приближаются по точности к цифровой реализации, превосходя ее по эффективности расположения на кристалле и энергоэффективности. В частности, это позволит в дальнейшем реализовать на данной технологии концепцию периферийных вычислений.

С. А. Щаников рассказал и о собственных разработках института. В этом году в рамках научной программы НЦФМ по направлению ИИ в ННГУ имени

Н. И. Лобачевского разработан активный кроссбар мемристивных устройств, содержащий 32×8 шин и выполненный в рамках совмещенного техпроцесса. Кроссбар разваривается в стандартный 64-выводной металлокерамический корпус. Разработан ПАК с доступом к каждой ячейке и возможностью выполнения матричного умножения.



**Ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Нейроэлектроника и мемристивные наноматериалы», заведующий кафедрой радиотехнической электроники и наноэлектроники ЮФУ В. А. Смирнов**

в своем докладе отметил, что разработки в области новой ЭКБ позволят реализовать структуры, кото-

рые могут быть использованы для имитации чувств человека и найти применение в сфере робототехники.

Докладчик рассказал о направлениях, в которых ведется работа в лаборатории, что включает изготовление оксидов металлов с помощью электрохимического окисления как на макро-, так и на наноуровне с формированием оксидных структур с ангстремной точностью по толщине. Также был разработан алгоритм, позволяющий рассчитать влияние толщины тонких пленок, полученных методом импульсного лазерного осаждения, на эффект резистивного переключения в них. Исследовалось влияние режимов получения таких пленок на их электрофизические параметры и проводилась характеристика записи и стирания информации с помощью токовой атомно-силовой микроскопии. Кроме того, в лаборатории активно развивается направление исследования применения графена для изготовления как латеральных, так и вертикальных мемристивных структур.

Докладчик рассказал и о других работах, проводимых в лаборатории, в области создания мемристивных структур и устройств на их основе.

С использованием полученных в лаборатории структур был изготовлен прототип робототехнического комплекса в виде руки, реагирующей на изменение температуры воды, к которой она прикасается. Результаты исследования скорости реакции были также приведены в докладе.

В рамках последовавшей дискуссии участники мероприятия задали ряд вопросов докладчикам.

*Фото предоставлены ООО «ПрофКонференции»*

ЭЛЕКТРОНИКА НАНОЭЛЕКТРОНИКА ФОТОНИКА ПЕРВАЯ МИЛЛИАДА ДИОДИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ

ИНФО ПРО СТРАНСТВО ФЕССИОНАЛОВ

ТЕХНОСФЕРА

Мы на YouTube

Подписывайтесь



# ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ СЕРИЮ КНИГ «МИР РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Уникальность этой серии в том, что в редакционный совет вошли крупнейшие специалисты в данной области, которые в силу своих профессиональных обязанностей хорошо представляют как направление развития современных технологий, так и их востребованность в нашей стране. Члены редакционного совета принимают участие и в отборе книг для серии, и в научном редактировании, обеспечивая их высокий уровень. В настоящий момент в серии вышло более 30 книг.



Издательство «ТЕХНОСФЕРА» совместно с Департаментом РЭП Минпромторга РФ приглашает руководителей и специалистов предприятий радиоэлектронной промышленности к участию в издании серии «Мир радиоэлектроники».



Если у Вас есть желание издать свою книгу или принять участие в научном редактировании переводного издания, направляйте Ваши предложения по адресу [redsovet\\_knigi@electronics.ru](mailto:redsovet_knigi@electronics.ru)

## Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91  
По факсу: +7 495 956-33-46  
E-mail: [knigi@technosphaera.ru](mailto:knigi@technosphaera.ru)  
[sales@technosphaera.ru](mailto:sales@technosphaera.ru)

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ  
[www.technosphaera.ru](http://www.technosphaera.ru)