

Микроэлектронные технологии – ключевой драйвер инноваций в биомедицине

Рассказывает заместитель директора по научной работе
Института биомедицинских систем НИУ МИЭТ А. Ю. Герасименко



Институт биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» проводит исследования по широкому спектру направлений, включая биомедицинские нанотехнологии, биосовместимые наноматериалы и имплантаты, системы вспомогательного кровообращения, гемодиализные системы, биомедицинскую оптику, биомедицинские компьютерные технологии и др. Эти междисциплинарные исследования находятся на стыке наук о материалах, химии, физики и предполагают использование современных достижений в области электроники для создания новых и развития существующих образцов медицинской техники. О важнейших технологиях микроэлектроники, востребованных сегодня для развития биомедицины, и перспективных проектах в области имплантируемых биомедицинских систем, которые реализует НИУ МИЭТ, нам рассказал заместитель директора по научной работе Института биомедицинских систем НИУ МИЭТ Александр Юрьевич Герасименко.

Александр Юрьевич, вы недавно вошли в Межведомственный научный совет по нейронаукам при Президиуме РАН. Каковы задачи этого совета? Какие направления исследований входят в сферу его компетенций?

Ключевой задачей совета является объединение усилий ведущих ученых и экспертов из инженерных, медицинских и гуманитарных наук. Междисциплинарная интеграция необходима для обеспечения технологического развития и внедрения уникальных разработок в клиническую практику. Я вошел в состав рабочей группы, основной задачей которой является решение ключевых вопросов, связанных с развитием исследований и разработок в области медицинской и физико-технической нейробиологии, включая экспертизу текущего состояния,

подготовку предложений по поддержке и координации междисциплинарных проектов.

В настоящий момент биомедицинские направления, в том числе нейронауки, невозможны без микроэлектронных технологий, нанотехнологий, аддитивных технологий, поскольку такие технологии позволяют обеспечивать быстрое прототипирование моделей *in vitro*, *in vivo*, *in silico* (в пробирке с клетками, в живом организме, при компьютерном моделировании) для тестирования и доставки лекарств, разработки микрофизиологических систем на основе нервных клеток и новых материалов для нейробиоинженерных конструкций, создания приборов и технологий для контролируемого нейрогенеза и ангиогенеза, осуществления диагностики и лечения заболеваний нервной системы, оценки мозговой активности

и коррекции старения мозга. Такие технологические подходы позволяют изучать поведение клеток и тканей нервной системы для создания их цифровых двойников, а также модулей головного мозга и нервной системы в целом с помощью алгоритмов машинного обучения.

Одним из важных направлений работы совета является курирование междисциплинарной подготовки кадров для разработки и внедрения инновационных технологий, материалов и приборов в нейронауках. Электронные системы в таком междисциплинарном подходе играют ключевую роль.

То, что биомедицина и микроэлектроника в ряде областей находят точки соприкосновения, видно в том числе по докладам, представляемым в последние годы на форуме «Микроэлектроника». В частности, такими областями являются имплантируемые системы и биоэлектронные интерфейсы. С вашей точки зрения, как сотрудника ведущей российской научно-образовательной организации в сфере микроэлектроники, какие микроэлектронные технологии, подходы, решения сейчас наиболее востребованы для развития биомедицины? Как бы вы оценили возможности отечественной микроэлектронной отрасли в этом вопросе?

Нужно учитывать, что имплантируемые микроэлектронные устройства представляют собой сложные системы, которые необходимо рассматривать по составляющим их частям и компонентам с целью достижения понимания физического смысла, фундаментальных закономерностей их взаимодействия между собой и всей системы с организмом. Такие устройства содержат блок с интегральными схемами, которые позволяют регистрировать биологические сигналы, например, биопотенциалы или позволяют формировать стимулирующие импульсы с заданными параметрами. Для разработки этих интегральных схем используются классические микроэлектронные технологии, связанные с литографией, изготовлением фотошаблонов и другими технологическими процессами. Но взаимодействие имплантируемого устройства с биологической тканью происходит через электродный интерфейс. Поэтому интерфейс должен обладать, помимо необходимых электрофизических свойств, еще и определенными механическими и биологическими свойствами, приближенными к свойствам самой биоткани. Для создания биоэлектронных интерфейсов крайне важны новые проводниковые, диэлектрические и полупроводниковые материалы, а также методы формирования из них заданных топологий. Такие методы могут реализовываться с помощью классических технологий масочной литографии, а могут использоваться и наиболее современные методы безмасочной литографии, мягкой литографии, методы, связанные со спрей-осаждением жидких сред с наноматериалами

с последующим воздействием концентрированными потоками энергии, например, лазерным излучением. Таким образом, конвергенция новых композиционных материалов с методами формирования из них заданных топологий на макро-, микро- и наноуровнях позволяет создавать наиболее совместимые электродные интерфейсы с биотканью, в которую они имплантированы.

Что касается отечественной отрасли, то здесь есть серьезные вызовы, но и значительные успехи. Медицинские организации столкнулись с большой проблемой, связанной с невозможностью импортировать имплантируемые устройства, необходимые для жизни многих людей. Поэтому мы в МИЭТ проводим работы по разработке и применению существующих микроэлектронных технологий для создания интегральных схем и электродных интерфейсов в системах электрической стимуляции. Наш крупный научный проект Минобрнауки России по получению фундаментальных научных результатов для создания первого отечественного имплантируемого нейростимулятора с биологической обратной связью как раз нацелен на преодоление этих вызовов и создание конкурентоспособных решений на собственной элементной базе и биосовместимых материалах. Мы движемся к созданию полного цикла разработки таких устройств в стране. Очень важно, что в МИЭТ появился стратегический технологический проект «Имплантируемая медицинская микроэлектроника» в рамках программы Приоритет-2030, направленный на ускорение перехода результатов исследований в области создания имплантируемых медицинских микроэлектронных технологий в технологические инновации с высоким коммерческим потенциалом и значительным влиянием на общество.

Каков статус крупного научного проекта? Какие результаты ожидаются от его реализации и что они принесут для общества?

Крупный научный проект находится в активной фазе реализации. В ходе проекта мы создаем фундаментальные основы, но придерживаясь логики: от фундаментальных и поисковых исследований до внедрения их результатов – создания первого отечественного имплантируемого нейростимулятора с биологической обратной связью. Полученные результаты в крупном научном проекте определяют развитие гражданского сектора проектирования и производства имплантируемых интегральных схем биомедицинского назначения и, в целом, отечественной биомедицинской доверенной имплантируемой микроэлектроники. Это влияет на конкурентоспособность отечественных междисциплинарных микроэлектронных технологий по отношению к передовому мировому уровню разработок нейроинтерфейсов и станут одной из точек роста отечественной реабилитационной индустрии, обеспечивая технологический суверенитет России в области нейротехнологий.

Для общества это означает появление принципиально нового, высокотехнологичного метода лечения хронической боли, с которой невозможно справиться с помощью лекарств. Системы электрической нейростимуляции позволят блокировать боль и восстанавливать двигательные функции у пациентов, значительно повышая качество их жизни и снижая зависимость от обезболивающих препаратов.

Какие еще исследования проводятся в Институте биомедицинских систем НИУ МИЭТ? Насколько в данных работах задействованы студенты вуза?

Направления института связаны с исследованиями и разработкой стационарных, носимых на теле и имплантируемых биомедицинских систем диагностического и терапевтического характера. Многие научные результаты воплотились в изделия медицинского назначения, которые используются в клинике. К таким изделиям относятся аппарат вспомогательного кровообращения, автоматический дефибриллятор, стационарный гемодиализный аппарат. Важным направлением является полностью искусственная имплантируемая почка. Ведь пациенты с нарушенной работой почек привязаны к гемодиализным центрам и должны как минимум два раза в неделю осуществлять сеансы по 6–8 ч. По статистике 2025 года, таких пациентов, которым оказывается помощь, – около 60 тыс. в России. Таким образом, с помощью имеющихся компетенций и опыта в Институте биомедицинских систем МИЭТ, а также микроэлектронных технологий и новых материалов при определенном финансировании есть возможность создать полностью искусственную имплантируемую почку. В институте был разработан экспериментальный образец микроэлектронной системы, позволяющей неинвазивно определять уровень глюкозы в крови. Эта система включает носимый модуль на руке человека, алгоритмы определения уровня глюкозы и программное обеспечение, реализующее связывание носимого модуля со смартфоном.

Одним из ключевых направлений является исследование и разработка систем беспроводного питания для носимых и имплантируемых медицинских приборов. Полученные фундаментальные результаты, связанные с переносом энергии через биоткани, позволяют создать энергоэффективные системы зарядки приборов, в том числе для имплантируемых нейростимуляторов.

Во всех научных проектах активное участие принимают студенты и аспиранты, они являются неотъемлемой частью команды. Молодые коллеги регулярно становятся лауреатами конкурсных программ по получению стипендий Президента, Всероссийского инженерного конкурса, «У.М.Н.И.К.» и др. В рамках проектов защищается большое количество бакалаврских и магистерских дипломов, а также кандидатских и докторских диссертаций по специальностям от физико-математических

до технических и медицинских наук. В целом, в наших исследованиях участвует более 50 студентов и аспирантов, которые получают уникальный опыт работы над задачами мирового уровня.

Насколько можно судить по публикациям, ваши научные интересы во многом связаны с получением и исследованием свойств наноматериалов. Какие возможные области применения наноматериалов в микроэлектронике вы бы выделили как наиболее перспективные на текущий момент? В каких задачах в области микроэлектронных технологий они принесли практические результаты за последнее время, а в каких – результаты можно ожидать в скором будущем?

В область моих научных интересов входит исследование физических воздействий на материалы, наноматериалы и биоматериалы с целью синтеза новых композиционных материалов с управляемыми структурными, электрофизическими, оптическими и механическими свойствами и создание устройств на их основе. Такие композиционные материалы эффективно применяются для создания нанопроводников в интегральных схемах, полевых катодов, биочипов, тензочувствительных датчиков, актуаторов, микроэлектромеханических систем, оптических переключателей, насыщающихся поглотителей в модуляторах добротности и ограничителях мощного лазерного излучения. Эти исследования находятся на стыке наук о материалах, химии, физики и инженерии, фундаментальные результаты которых имеют серьезную перспективу для трансформации в прорывные технологии для гражданской микроэлектроники и оптики, биомедицинских систем, которые значительно повышают качество жизни населения нашей страны.

Особый интерес в этом отношении представляют наноматериалы, формируемые из систем углеродных наночастиц под воздействием лазерного излучения. Углеродные нанотрубки и графен с уникальным сочетанием физических свойств признаны одними из самых перспективных объектов нанотехнологий. Однако ключевой задачей на пути от изучения свойств к созданию реальных устройств из систем углеродных нанотрубок и графена является разработка методов управления ими и формирования из них двумерных и трехмерных каркасных архитектур. Именно такие архитектуры способны реализовать потенциал углеродных наноматериалов в полной мере, будь то создание проводящих межсоединений в интегральных схемах нового поколения, эффективных эмиссионных катодов или же биосовместимых матриц для гибких биоэлектронных компонентов и биоразлагаемых тканеинженерных конструкций для восстановления биологических тканей.

Уже продемонстрирована эффективность разработанных наноматериалов в реальных биологических системах

и создание на их основе конкретных медицинских материалов, изделий и технологий: начиная от интерфейсов для электростимуляции роста клеток, заканчивая имплантатами для восстановления хрящей, связок суставов, сердца и технологией лазерной «сварки» рассеченных биотканей.

Полученные уникальные результаты в области биомедицинских материалов и материалов для электроники позволили достичь прогресса в создании интерфейсов, стирающих границы между живыми и электронными системами. Благодаря разработанным в нашей лаборатории технологиям становится возможным создание биоэлектронных интерфейсов третьего поколения, которые должны не только обеспечивать непрерывное взаимодействие носимых и имплантируемых электронных приборов с организмом, но и иметь адгезию к влагонасыщенной поверхности, обеспечивать иммунную совместимость и обладать заданным сроком функционирования, после чего должны биоразлагаться. Кроме того, они могут быть сформированы по месту нахождения в организме с программируемой формой, пористостью, проницаемостью или вязкостью.

Вы являетесь модератором Секции № 10 «Биомедицинская электроника» Школы молодых ученых Российского форума «Микроэлектроника». Что вы ожидаете от секции в этом году? В каких направлениях в рамках темы секции вы видите наибольшую активность ее участников?

Поскольку подготовка к проведению форума «Микроэлектроника» осуществляется тщательным образом более чем за полгода, то я уже знаю наиболее популярные направленности тематик. В этом году, в том числе, были приглашены молодые ученые, представившие замечательные доклады на научно-технической конференции «Микроэлектронные имплантируемые нейроинтерфейсы 2025», председателем организационного комитета которой я являюсь. Поэтому, учитывая этот факт и мировые научные тренды, наибольшая активность наблюдается по нескольким направлениям. Первое – это электроника для взаимодействия с нервной системой и нейроморфные технологии. Второе – разработка новых биосовместимых материалов, без которых невозможен прогресс в области биоэлектроники, а также реабилитационная и диагностическая электроника, в том числе гибкая электроника, которая находится на теле пациента 24 ч 7 дней в неделю. Третье – применение методов искусственного интеллекта для обработки биомедицинских сигналов, что позволяет создавать более «умные» и адаптивные устройства в реальном времени. Как и в прошлом году, я ожидаю увидеть еще более высокий уровень междисциплинарных докладов. Я надеюсь, что участники представят доклады, демонстрирующие

глубокое понимание электрофизических процессов, учитывающие биологические аспекты. Уверен, секция пройдет плодотворно для молодых ученых, что позволит им закрепиться в области биомедицинской электроники, испытывающей потребность в кадрах.

В последнее время за рубежом появляются конференции на стыке биомедицины и электроники, чего стоит деятельность только Илона Маска. В чем уникальность конференции «Микроэлектронные имплантируемые нейроинтерфейсы», председателем оргкомитета которой вы являетесь?

В России таких конференций не так много, а конференций, связанных с имплантируемой микроэлектроникой, нет, кроме нашей конференции. Основной целью этой уникальной конференции является поиск и развитие перспективных междисциплинарных научных направлений на стыке микроэлектроники, материаловедения и нейротехнологий для достижения технологического лидерства Российской Федерации в области медицинских изделий, включая биогибридные, бионические и нейротехнологии, определенные указом Президента России.

В последнее время крайне важным является развитие гражданского сектора проектирования и производства отечественных микроэлектронных интегральных схем и, в целом, биомедицинской имплантируемой микроэлектроники. Конференция позволяет определить пути преодоления самых сложных вызовов, стоящих перед этой областью. Поскольку плодотворные дискуссии с яркими докладами и новыми идеями приближают нас к созданию технологий, способных кардинально улучшить качество жизни людей нашей страны.

В 2026 году ключевыми трендами конференции будут являться долгосрочная устойчивость бионических нейроинтерфейсов за пределами лабораторных условий. Например, крайне важна параметрическая устойчивость, которая характеризует сохранение эксплуатационных параметров нейроинтерфейсов в процессе длительной работы. К таким параметрам относятся импеданс электродов, пороги стимуляции, чувствительность регистрации, уровень шумов, характеристики декодирования нейронной активности, параметры алгоритмов обработки сигналов и др. Даже при отсутствии механических повреждений нейроинтерфейсов постепенный дрейф эксплуатационных параметров может возникать вследствие реакции тканей на имплантат в длительном периоде времени. Для выполнения требований реальных условий организма необходимы надежные микроэлектронные технологии, материалы и методы испытаний, которые будут обсуждаться на МИН-2026.

Спасибо за интересный рассказ.

Материал подготовлен В. Б. Ежовым