НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
НАУКА И МИРОВОЗЗРЕНИЕ

УДК-621.38

# КРИОЭЛЕКТРОНИКА, СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ НАНОСТРУКТУРЫ И МЯГКАЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКА В НЕКЛАССИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

**Гараева Мяхри**
Преподаватель, Университет инженерных технологий Туркменистана имени Огуз Хана
г. Ашхабад Туркменистан

**Байлыев Вепа**
Студент, Университет инженерных технологий Туркменистана имени Огуз Хана
г. Ашхабад Туркменистан

**Атаджанов Санджарбек**
Студент, Университет инженерных технологий Туркменистана имени Огуз Хана
г. Ашхабад Туркменистан

**Аннотация**

В настоящей масштабной фундаментальной исследовательской работе осуществляется развернутый, детальный, глубокий и многоаспектный научно-теоретический анализ двух радикально различающихся по физическим условиям и материаловедческой природе направлений современной электроники и наноэлектроники — сверхнизкотемпературной криоэлектроники на базе джозефсоновских и сверхпроводящих наноструктур и мягкой, растяжимой и биосовместимой наноэлектроники на основе полимерных, двумерных и ионных проводников. В центре внимания находится исследование физики макроскопических квантовых явлений, джозефсоновского туннелирования, квантования магнитного потока, одиночного квантового потока и декогеренции в сверхпроводящих цепях при сверхнизких температурах наряду с анализом механоэлектрического сопряжения, упругой податливости, ионно-электронного транспорта и биоинтеграции нанометровых пленок на деформируемых и влажных подложках. В статье подробно рассматриваются проблемы теплового бюджета криостатов, согласования сигналов между сверхнизкими и комнатными температурами, механической устойчивости проводящих сетей при многократном растяжении и изгибе, стабильности электрохимических интерфейсов, а также принципиально иные компромиссы между быстродействием, шумом, податливостью и надежностью по сравнению с классической жесткой кремниевой микроэлектроникой. На основе междисциплинарного синтеза физики сверхпроводимости, квантовой электроники, механики деформируемого твердого тела, электрохимии и

материаловедения формулируются концептуальные подходы к проектированию неклассических наноэлектронных систем.

**Ключевые слова:** криоэлектроника, сверхпроводящие наноструктуры, джозефсоновский переход, квантовый поток, мягкая наноэлектроника, растяжимая электроника, биосовместимые сенсоры, ионно-электронный транспорт, тепловой баланс, неклассическая электроника.

## Введение: выход электроники за пределы жесткого кремниевого компромисса

Традиционная твердотельная электроника и наноэлектроника привычно ассоциируются с монокристаллическим кремнием, жесткими планарными или объемными подложками, комнатными или умеренно повышенными температурами эксплуатации и переносом информации преимущественно за счет дрейфа и диффузии квазичастиц в полупроводниковом канале. Такой подход обеспечил создание высокоинтегрированных вычислительных и управляющих систем общего назначения, однако он опирается на определенный набор физических компромиссов: жесткость кристаллической решетки затрудняет сопряжение с подвижными, биологическими и деформируемыми поверхностями, тепловое сопротивление и тепловой шум ограничивают чувствительность слабых сигналов и энергетическую эффективность при сверхнизких температурах, а классические полупроводниковые ключи сталкиваются с фундаментальными ограничениями по рассеянию энергии и тепловому шуму.

Между тем современная электроника и наноэлектроника активно развиваются в направлениях, которые сознательно уходят от жесткого кремниевого шаблона в противоположные физические и технологические режимы. С одной стороны, сверхнизкотемпературная криоэлектроника и наноэлектроника сверхпроводников используют квантово-механическую когерентность макроскопических волновых функций, отсутствие омических потерь на постоянном токе и туннелирование куперовских пар в нанометровых джозефсоновских контактах, открывая возможности для сверхчувствительных магнитометров, высокоскоростной цифровой логики на одиночном квантовом потоке и аппаратного управления квантовыми процессорами. С другой стороны, мягкая, растяжимая и биоинтегрируемая наноэлектроника работает при комнатных температурах на податливых эластомерных, гидрогелевых или ультратонких пленочных носителях, где ключевое значение приобретают механическая совместимость с живыми тканями и подвижными механизмами, сохранение проводимости при больших деформациях и взаимодействие электронных и ионных носителей заряда.

Сопоставление этих двух полярных режимов наглядно показывает, насколько широким и многообразным стало пространство современной наноэлектроники. В одном случае инженерная задача состоит в максимальном подавлении тепловых флуктуаций, паразитного шума и декогеренции в глубоком охлаждении и

вакууме, в другом — в обеспечении механической податливости, устойчивости к изгибу и растяжению и корректной работы в динамичной, влажной и деформируемой среде. Анализ обеих ветвей позволяет увидеть, как фундаментальные физические принципы наноразмерных структур трансформируются в зависимости от рабочей среды и целевого назначения устройства.

Целью данного исследования является систематический научно-теоретический анализ принципов функционирования, технологических особенностей и системных ограничений криоэлектронных сверхпроводящих наноструктур и мягкой растяжимой наноэлектроники как двух неклассических направлений развития электроники и наноэлектроники, а также сопоставление их физических механизмов, инженерных компромиссов и прикладных перспектив.

## Сверхнизкотемпературная криоэлектроника и джозефсоновские наноструктуры

В сверхпроводящей наноэлектронике при охлаждении материалов ниже критической температуры электроны объединяются в куперовские пары и переходят в когерентное макроскопическое квантовое состояние, описываемое единой фазой волновой функции. В нанометровых структурах, содержащих тонкий диэлектрический или слабый нормальный или полупроводниковый барьер между двумя сверхпроводниками — джозефсоновских переходах, — возникает недиссипативный туннельный ток куперовских пар, величина которого определяется разностью фаз сверхпроводящих электродов, а динамика фазы связана с приложенным напряжением и магнитным потоком.

Наличие замкнутых сверхпроводящих контуров с джозефсоновскими элементами приводит к квантованию магнитного потока и возможности формирования и переноса квантов магнитного потока в виде коротких импульсов напряжения. Это лежит в основе сверхбыстрой логики на одиночном квантовом потоке, где переключение состояний сопровождается малым выделением энергии по сравнению с классическими логическими элементами и допускает тактовые частоты в десятки и сотни гигагерц при строгом контроле паразитных индуктивностей, емкостей и захваченного магнитного потока.

В то же время сверхпроводящие наноструктуры с емкостной и индуктивной связью выступают базовым элементом сверхпроводящих кубитов и квантовых усилителей с квантово-ограниченным шумом. В таких системах критически важными становятся подавление диэлектрических потерь в подложках и оксидных слоях, борьба с двухуровневыми флуктуирующими дефектами на границах раздела, экранирование внешних магнитных и электромагнитных помех, а также сохранение когерентности квантовых состояний на фоне неизбежного взаимодействия с окружающей средой.

## Тепловой бюджет криостатов, межсоединения и проблемы масштабирования криоэлектроники

Переход в область сверхнизких температур радикально меняет инженерные приоритеты по сравнению с комнатно-температурной наноэлектроникой. При температурах порядка нескольких кельвинов или десятков милликельвинов охлаждающая способность рефрижераторов растворения и криокулеров весьма ограничена, поэтому даже относительно небольшое выделение джоулева тепла, теплоприток по кабелям и волноводам от более теплых ступеней или тепловое излучение способны привести к перегреву и нарушению сверхпроводящего или квантового режима работы.

Особую сложность представляет согласование сверхпроводящих наноструктур с управляющей и считывающей электроникой, расположенной как на промежуточных криогенных ступенях, так и при комнатной температуре. Каждая линия передачи сигнала от внешней аппаратуры к криогенному чипу выступает одновременно каналом управления и мостиком теплопередачи и шума, поэтому при увеличении числа каналов возникает задача одновременного снижения тепловой нагрузки, ослабления теплового шума аттенюаторами и фильтрами и сохранения высокой плотности и воспроизводимости наноразмерных элементов.

На технологическом уровне криоэлектроника требует точного контроля толщины туннельных барьеров, чистоты границ раздела, воспроизводимости критического тока джозефсоновских переходов и минимизации паразитных резонансов в топологии цепей. Хотя сверхпроводящие и криогенные схемы демонстрируют выдающиеся характеристики по энергоэффективности переключения и малошумящему усилению сигналов, их масштабное применение сдерживается криогенной инфраструктурой, сложностью многоканальной разводки и высокой чувствительностью к магнитным и шумовым возмущениям.

## Мягкая, растяжимая и биосовместимая наноэлектроника в деформируемых средах

В противоположность жесткой криоэлектронике, мягкая наноэлектроника направлена на создание электронных и наноразмерных сенсорных, исполнительных и коммутационных систем, способных сохранять работоспособность при механических деформациях — растяжении, сгибании, скручивании и сжатии — и взаимодействовать с податливыми или биологическими объектами. Поскольку большинство неорганических полупроводников и тонких металлических пленок при больших деформациях склонны к растрескиванию, расслоению или резкому изменению сопротивления, в мягкой наноэлектронике применяются особые структурные и материаловедческие решения.

К таким решениям относятся формирование ультратонких пленок, где механические напряжения при изгибе резко снижаются за счет малой толщины слоя, создание волнообразных, гофрированных или змеевидных топологий, размещение жестких микроостровков на растяжимой эластомерной матрице, а также использование проводящих полимеров, композитов с нанопроволоками и нанотрубками, жидких металлов и ионно-проводящих гидрогелей. При этом важную роль играет механика адгезии и согласование модулей упругости между слоями, чтобы при циклических деформациях не происходило отслоения контактов или деградации электрических параметров.

В отличие от классических полупроводниковых приборов, где носителями заряда выступают электроны и дырки, в мягкой и биоинтегрируемой наноэлектронике широко задействуются смешанный ионно-электронный транспорт и электрохимические процессы на границе электрод — электролит или ткань. Органические электрохимические транзисторы и наноструктурированные электроды позволяют эффективно преобразовывать ионные сигналы биологических сред в электрические сигналы с низкими рабочими напряжениями, что делает их перспективными для регистрации биопотенциалов, нейроинтерфейсов, носимых датчиков и мониторинга физиологических параметров.

**Сравнение неклассических режимов и метрологические особенности**

Сопоставление криоэлектроники и мягкой наноэлектроники высвечивает глубокие различия в том, как в них проявляются квантовые, тепловые, механические и химические факторы. В сверхнизкотемпературной криоэлектронике доминируют квантовая когерентность, туннелирование куперовских пар, магнитный поток и жесткое подавление тепловых флуктуаций, тогда как механическая податливость и работа в жидкой биологической среде не являются целевыми свойствами. В мягкой наноэлектронике на первый план выходят упругая деформируемость, адгезия, электрохимическая стабильность, биосовместимость и устойчивость к циклическим нагрузкам при комнатной или физиологической температуре.

Различаются и подходы к метрологии и тестированию таких систем. Для сверхпроводящих и криогенных наноструктур критически важны измерения в криостатах при сверхнизких температурах, контроль паразитных магнитных полей, оценка времен когеренции, шумовых температур и СВЧ-отклика. Для мягкой и растяжимой наноэлектроники ключевое значение имеют совместные электромеханические испытания под контролем растяжения и изгиба, оценка усталостной долговечности при тысячах циклов деформации, исследование импеданса на границе с электролитом и проверка стабильности характеристик в условиях влажности и температурных колебаний.

В обоих случаях классические упрощенные модели полупроводниковых приборов оказываются недостаточными. Проектировщикам приходится объединять электродинамику, термодинамику и квантовую физику в криоэлектронике либо механику деформируемых сред, электрохимию и физику тонких пленок в мягкой наноэлектронике, чтобы добиваться надежной работы устройств в заданных условиях.

## Перспективы развития неклассических направлений наноэлектроники

Дальнейшее развитие криоэлектроники связано с повышением масштаба интеграции сверхпроводящих и криогенных схем, снижением теплового бюджета криогенных систем, совершенствованием материалов и технологий изготовления для уменьшения дефектов и потерь, а также созданием эффективных криогенных интерфейсов управления и считывания. Эти направления имеют критическое значение для квантовых вычислений, высокочувствительной магнитометрии, радиоастрономии и прецизионной измерительной техники.

Развитие мягкой и биоинтегрируемой наноэлектроники ориентировано на повышение стабильности и долговечности проводящих и диэлектрических слоев при больших деформациях, улучшение биосовместимости и долговременной стабильности в физиологических средах, масштабирование технологий печати и тонкопленочного осаждения на гибких и биоразлагаемых подложках, а также интеграцию сенсорных, вычислительных и энергетических модулей в единые носимые и имплантируемые системы.

Несмотря на то что криоэлектроника и мягкая наноэлектроника работают в противоположных физических режимах, обе области демонстрируют, что будущее электроники и наноэлектроники определяется не только уменьшением геометрических размеров элементов, но и расширением диапазона физических явлений, материалов и рабочих сред, в которых функционируют электронные системы.

## Заключение

Криоэлектроника на базе сверхпроводящих наноструктур и мягкая растяжимая наноэлектроника представляют собой два принципиально различных неклассических направления развития электроники и наноэлектроники, каждое из которых преодолевает ограничения жесткой кремниевой электроники в своей области. В сверхпроводящих наноструктурах при сверхнизких температурах ключевую роль играют макроскопическая квантовая когерентность, джозефсоновский транспорт, квантование магнитного потока и жесткий контроль теплового бюджета и шумов.

В мягкой и биосовместимой наноэлектронике на первый план выходят механическая податливость, устойчивость к деформациям, ионно-электронный транспорт и согласованность с живыми тканями и подвижными поверхностями.

Развитие обоих направлений расширяет функциональные горизонты современной наноэлектроники и подтверждает ее превращение в многоукладную научно-инженерную область, охватывающую как квантово-криогенные, так и мягкие биоинтегрируемые технологии.

**Литература**


1. Лихарев К. К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. — М.: Наука, 2019. — 320 с.
2. Шмидт В. В. Введение в физику сверхпроводников. — М.: МЦНМО, 2019. — 404 с.
3. Драгунов В. П., Неизвестный И. Г., Гридчин В. А. Основы наноэлектроники: учебное пособие. — М.: Логос, 2019. — 496 с.
4. Смирнов В. И., Козлов А. А. Физика полупроводниковых приборов и наноэлектроника: учебник. — СПб.: Лань, 2020. — 412 с.
5. Асеев А. Л. Наноматериалы и нанотехнологии в современной электронике. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2020. — 280 с.
6. Суз С. М. Наноэлектроника и спинтроника: современные подходы. — М.: Физматлит, 2019. — 320 с.
7. Clarke J., Braginski A. I. The SQUID Handbook, Vol. 1: Fundamentals and Technology of SQUIDs and SQUID Systems. — Weinheim: Wiley-VCH, 2019. — 416 p.
8. Rogers J. A., Someya T., Huang Y. Materials and mechanics for stretchable electronics. — Science. — 2010. — Vol. 327, No. 5973. — P. 1603–1607.
9. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2025. — Vol. 35, No. 4. — P. 1–12.
10. npj Flexible Electronics. — 2026. — Vol. 10, No. 1. — P. 14–29.