НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
НАУКА И МИРОВОЗЗРЕНИЕ

УДК-621.382

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, АРХИТЕКТУРА И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

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

Сейтлиев Нурсахет
Студент, Университет инженерных технологий Туркменистана имени Огуз Хана
г. Ашхабад Туркменистан

Ходжаныязов Мердан
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 физических принципов, технологических подходов, схемотехнических и архитектурных решений, а также фундаментальных ограничений развития современной электроники и наноэлектроники при переходе к нанометровым и субнанометровым масштабам. В центре внимания находится исследование закономерностей переноса заряда в твердотельных структурах, квантово-механических эффектов размерного квантования, туннелирования и баллистического транспорта, проблемы короткоканальных эффектов, токов утечки и тепловыделения в сверхбольших интегральных схемах, эволюции транзисторных структур от планарных полевых транзисторов к многозатворным и объемным архитектурам, а также перспектив энергонезависимой памяти, спинтроники, нейроморфных и фотонных элементов. В статье подробно рассматриваются методы литографии и осаждения тонких пленок, межсоединения и паразитные емкости и сопротивления, трехмерная интеграция и гетерогенные чиплеты, а также метрология нанометровых структур. На основе междисциплинарного синтеза физики твердого тела, квантовой механики, полупроводниковой электроники, материаловедения и вычислительной архитектуры формулируются концептуальные представления о путях дальнейшего развития наноэлектроники за пределами классического масштабирования.

Ключевые слова: электроника, наноэлектроника, полупроводниковые приборы, квантовый транспорт, туннелирование, интегральные схемы, многозатворные транзисторы, энергонезависимая память, спинтроника, гетерогенная интеграция.

Введение: эволюция элементной базы от классической электроники к наноэлектронике

Развитие электроники на протяжении двадцатого и начала двадцать первого столетий определило облик современной науки, промышленности, связи, энергетики, медицины и информационных технологий. Переход от вакуумных электронных ламп к дискретным полупроводниковым приборам, а затем к монолитным интегральным схемам и сверхбольшим интегральным схемам позволил объединить на одном кристалле миллионы и миллиарды функциональных элементов, многократно снизив удельную стоимость вычислений, энергопотребление на одну операцию и массогабаритные характеристики электронных систем. Последовательное уменьшение характерных размеров элементов полупроводниковых структур обеспечивало рост плотности упаковки, повышение быстродействия и расширение функциональных возможностей вычислительных и управляющих устройств.

По мере приближения топологических норм к нанометровому и субнанометровому диапазонам классическая электроника закономерно переходит в область наноэлектроники, где характерные размеры активных областей, барьеров, квантовых ям, нанопроводов или туннельных контактов сопоставимы с длинами волн де Бройля носителей заряда, длинами свободного пробега электронов и дырок или масштабами пространственного изменения потенциала. На этом уровне описания привычные квазиклассические и диффузионно-дрейфовые модели переноса заряда требуют уточнения или дополнения квантово-механическими представлениями, а учет дискретности атомарной структуры и флуктуаций становится критически важным для прогнозирования характеристик приборов.

Одновременно усложнение архитектуры современных электронных систем выводит на первый план проблемы межсоединений, плотности рассеиваемой мощности, статистической вариативности параметров наноразмерных элементов и необходимости сочетать логические вычисления с высокоемкой и энергоэффективной памятью, сенсорикой, коммуникационными и специализированными ускорителями. В этих условиях развитие наноэлектроники опирается не только на совершенствование литографических и материаловедческих технологий, но и на поиск новых физических принципов обработки и хранения информации, новых трехмерных и гетерогенных компоновок и энергосберегающих архитектур.

Целью данного исследования является систематический научно-теоретический анализ физических, технологических и архитектурных основ современной электроники и наноэлектроники, рассмотрение квантовых и масштабных

закономерностей в наноразмерных структурах, оценка проблем масштабирования и тепловых ограничений, а также определение перспективных направлений развития элементной базы.

Квантово-механические закономерности и физика переноса заряда в наноструктурах

В наноэлектронных структурах поведение носителей заряда определяется взаимодействием кристаллической решетки, внешних и внутренних электрических и магнитных полей, границ раздела и квантово-механических свойств волновых функций электронов и дырок. Когда толщина слоя, диаметр канала или размер потенциальной ямы уменьшаются до нанометровых величин, возникает пространственное ограничение движения носителей в одном, двух или трех измерениях, что приводит к дискретизации энергетических уровней и изменению плотности состояний по сравнению с объемным полупроводником.

Эффекты размерного квантования проявляются в смещении краев зон, изменении эффективной ширины запрещенной зоны, модификации подвижности носителей и трансформации оптических и транспортных свойств наноструктур. В тонких каналах, квантовых ямах, квантовых проволоках и квантовых точках перенос заряда может приобретать квазибаллистический или баллистический характер, при котором длина свободного пробега носителей сопоставима с длиной активной области или превышает ее, а рассеяние на примесях, фононах или шероховатостях границ раздела становится определяющим фактором сопротивления и шумов.

Существенную роль в наноэлектронике играет квантово-механическое туннелирование через тонкие потенциальные барьеры — подзатворные диэлектрики, гетеропереходы, туннельные контакты или барьеры Шоттки. Если на ранних этапах развития полевых транзисторов туннельный ток через тонкий оксид рассматривался преимущественно как нежелательный паразитный эффект, то в ряде наноэлектронных приборов — таких как туннельные диоды, резонансно-туннельные структуры, одноэлектронные приборы или туннельные полевые транзисторы — туннелирование используется как основной рабочий механизм управления током или зарядом.

Эволюция транзисторных структур, короткоканальные эффекты и межсоединения

Дальнейшее уменьшение длины канала планарных полевых транзисторов сопряжено с усилением короткоканальных эффектов, при которых исток и сток оказывают существенное влияние на распределение потенциала в канале, ослабляя управляющую роль затвора. Это приводит к снижению порогового напряжения, ухудшению подпороговых характеристик, возрастанию токов утечки в выключенном состоянии, снижению коэффициента усиления и повышению чувствительности параметров прибора к нанометровым отклонениям геометрии и концентрации легирующей примеси.

Для сохранения электростатического контроля над каналом и подавления паразитных утечек в наноэлектронике произошел переход от планарной геометрии к объемным и многозатворным структурам, где затвор охватывает канал с нескольких сторон или полностью окружает его, а также к применению диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью и металлических затворов. Подобные архитектуры позволяют уменьшать емкостные и резистивные потери, снижать рабочее напряжение и повышать энергетическую эффективность переключения, однако предъявляют высокие требования к точности формирования трехмерных профилей и контролю границ раздела.

По мере роста числа транзисторов на кристалле узким местом все чаще становятся системы межсоединений и разводки питания. При уменьшении сечения металлических проводников и увеличении их длины возрастают омическое сопротивление, плотность тока и риск электромиграции, а при сближении линий усиливаются межпроводниковые емкости и перекрестные наводки. Поэтому оптимизация материалов проводников и барьерных слоев, применение низкодиэлектрических изоляторов, совершенствование тактовой и распределительной сетей питания и переход к пространственным компоновкам становятся не менее важными, чем совершенствование самого транзистора.

Энергонезависимая память, спинтроника и альтернативные парадигмы вычислений

Традиционное разделение логических блоков и энергозависимой оперативной памяти в классических вычислительных архитектурах порождает существенные задержки и энергетические издержки при пересылке больших объемов данных между памятью и процессором. В связи с этим в наноэлектронике активно развиваются энергонезависимые элементы памяти нового поколения, способные хранить информацию за счет изменения сопротивления, фазового состояния или магнитной ориентации и допускающие плотную интеграцию и сопряжение с полупроводниковыми схемами.

К числу перспективных направлений относятся резистивная память, фазовая память на основе халькогенидных материалов, сегнетоэлектрические структуры и магниторезистивная память на туннельных магнитных переходах. В магниторезистивной памяти и спинтронике в целом в качестве носителя или способа представления информации наряду с электрическим зарядом используется спин электрона и спиновый ток, что открывает возможности для энергонезависимого хранения, переноса спинового момента и создания маломощных элементов логики и памяти.

Наряду с совершенствованием цифровых схем исследуются альтернативные и специализированные парадигмы обработки информации, включая аналоговые и матричные вычисления в памяти для ускорения векторно-матричных операций, нейроморфные архитектуры, моделирующие принципы работы биологических

нейронных сетей и синаптической пластичности, а также оптические и фотонные элементы для высокоскоростной передачи данных с малыми потерями. При этом новые физические принципы оцениваются с точки зрения совместимости с массовым производством, помехоустойчивости, воспроизводимости параметров и реального выигрыша по удельной энергии на операцию.

Технологии изготовления, метрология и системные ограничения

Создание наноэлектронных структур требует высокоточных технологических процессов, способных формировать элементы размером в единицы или десятки нанометров с жестким контролем геометрии, состава, толщины слоев и дефектности. Ключевую роль играют современные методы литографии, включая литографию в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне, электронно-лучевую литографию, анизотропное плазмохимическое травление, атомно-слоевое осаждение и эпитаксиальный рост тонких пленок и гетероструктур. На нанометровом уровне даже единичные дефекты кристаллической решетки, примесные атомы, шероховатость границ или вариации толщины диэлектрика на несколько монослоев способны заметно изменить электрические характеристики прибора.

Неотъемлемой частью развития наноэлектроники является метрология и диагностика на нанометровом масштабе, позволяющая измерять геометрические размеры, химический состав, напряжения в кристаллической решетке, распределение потенциалов и дефекты без разрушения или с контролируемым анализом образцов. Методы электронной и зондовой микроскопии, рентгеновской диагностики, спектроскопии и электрических измерений в сочетании с моделированием позволяют связывать технологические режимы с итоговыми характеристиками приборов и интегральных схем.

На системном уровне развитие электроники и наноэлектроники упирается в комплекс взаимосвязанных ограничений: плотность тепловыделения и трудности отвода тепла в высокоплотных кристаллах, статистическую вариативность параметров элементов, рост стоимости и сложности оборудования, а также необходимость согласовывать физику приборов, схемотехнику, системное программное обеспечение и задачи конечных приложений. Преодоление этих ограничений требует совместной оптимизации всех уровней иерархии — от атомарных слоев материала до трехмерных гетерогенных систем и алгоритмов.

Заключение

Электроника и наноэлектроника находятся на этапе глубокой трансформации, при которой уменьшение линейных размеров элементов сочетается с освоением квантовых закономерностей переноса заряда, переходом к объемным и трехмерным архитектурам, развитием энергонезависимой памяти, спинтроники и гетерогенной интеграции. На нанометровых масштабах учет размерного квантования, туннелирования, рассеяния, токов утечки и тепловых процессов

становится ключевым условием проектирования надежных и энергоэффективных приборов.

Дальнейший прогресс в этой области зависит от сочетания прецизионного материаловедения и нанотехнологий с новой схемотехникой, трехмерной компоновкой и энергосберегающими вычислительными архитектурами. Согласованное развитие фундаментальной физики наноструктур, технологии производства и системного проектирования определяет возможности создания электронных систем нового поколения.

Литература

1. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. — М.: Техносфера, 2019. — 336 с.
2. Драгунов В. П., Неизвестный И. Г., Гридчин В. А. Основы наноэлектроники: учебное пособие. — М.: Логос, 2019. — 496 с.
3. Асеев А. Л. Наноматериалы и нанотехнологии в современной электронике. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2020. — 280 с.
4. Смирнов В. И., Козлов А. А. Физика полупроводниковых приборов и наноэлектроника: учебник. — СПб.: Лань, 2020. — 412 с.
5. Уэст Н., Харрис Д. Архитектура КМОП-микросхем: теория и проектирование. — М.: Вильямс, 2020. — 832 с.
6. Суз С. М. Наноэлектроника и спинтроника: современные подходы. — М.: Физматлит, 2019. — 320 с.
7. Datta S. Quantum Transport: Atom to Transistor. — Cambridge: Cambridge University Press, 2019. — 404 p.
8. Taur Y., Ning T. H. Fundamentals of Modern VLSI Devices. — Cambridge: Cambridge University Press, 2021. — 620 p.
9. IEEE Transactions on Electron Devices. — 2025. — Vol. 72, No. 3. — P. 1120–1138.
10. Nature Electronics. — 2026. — Vol. 9, No. 1. — P. 24–39.