



КВАНТОВЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СОВРЕМЕННОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ: ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ, ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЫ СКАЛИРОВАНИЯ

Аганиязова Нурана

Преподаватель, Университет инженерных технологий Туркменистана имени
Огуз Хана

г. Ашхабад Туркменистан

Абраева Мерджен

Преподаватель, Университет инженерных технологий Туркменистана имени
Огуз Хана

г. Ашхабад Туркменистан

Аннотация

В настоящем максимально развернутом, предельно детализированном, фундаментальном, исчерпывающем, монументальном и многократно расширенном научно-техническом и физико-математическом исследовании представлен принципиально новый, глубоко проработанный и всесторонне обоснованный ракурс рассмотрения теоретических, квантово-механических, материаловедческих и схемотехнических аспектов развития нанoeлектроники в условиях исчерпания традиционных возможностей кремниевого масштабирования. Исследование базируется на глубоком и системном анализе классических законов физики твердого тела, новейших достижений в области создания квантовых точек, углеродных нанотрубок, двумерных гетероструктур, спинтроники, одноэлектронных транзисторов и молекулярных переключателей, а также комплекса технологических, термодинамических и квантово-химических факторов, определяющих транспорт носителей заряда в ультрамалых пространственных областях. В работе детально и с исчерпывающей полнотой исследуются физика туннельных процессов через ультратонкие диэлектрические барьеры, баллистический перенос электронов, квантовое ограничение в низкоразмерных системах, а также трехмерные архитектуры полевых транзисторов с затвором по всему периметру канала. Предложены комплексные расчетные, прогностические и материаловедческие модели преодоления тепловых и квантовых ограничений закона Мура, а также детально рассмотрены малоизученные аспекты снижения токов утечки, диссипации тепла и подавления флуктуационных шумов в наноразмерных чипах.

Ключевые слова: наноэлектроника, квантовые наноструктуры, баллистический транспорт, двумерные материалы, закон Мура, спинтроника, мемристоры, квантовые точки, туннельный эффект, полупроводниковые гетероструктуры.

Введение

Развитие современной физики полупроводников, микро- и наноэлектроники, твердотельной технологии и материаловедения во всем многообразии их теоретических, инженерных и прикладных направлений неразрывно связано с необходимостью глубокого теоретического и практического осмысления качественного перехода элементной базы вычислительной техники на наноразмерный уровень. На протяжении нескольких десятилетий колоссальный прогресс в наращивании производительности микропроцессорных систем базировался на экстенсивном уменьшении геометрических размеров планарных полевых транзисторов в строгом соответствии с эмпирическим законом Мура. Однако по мере того, как технологические нормы производства вплотную приблизились к атомарным масштабам в несколько единиц нанометров, классическая кремниевая микроэлектроника столкнулась с непреодолимыми фундаментальными квантово-механическими, термодинамическими и технологическими барьерами. При таких размерах классические законы переноса заряда уступают место квантовой механике, где доминирующими факторами становятся туннелирование электронов сквозь запирающие изоляционные барьеры, квантовое ограничение носителей в потенциальных ямах, флуктуации количества примесных атомов в канале и критическая плотность тепловыделения на единицу площади кристалла. Глубинный физико-математический и материаловедческий анализ этих процессов позволяет выявить фундаментальные закономерности поведения материи в низкоразмерных системах, что имеет определяющее значение для проектирования элементной базы компьютеров нового поколения.

Традиционные подходы к проектированию интегральных схем, опиравшиеся на скалирование геометрии традиционных кремниевых структур, в современных условиях исчерпали свой эволюционный потенциал. Наноэлектроника требует принципиально иной методологической парадигмы, основанной на управлении электронными свойствами веществ на уровне отдельных атомов и молекул, использовании новых физических механизмов переноса заряда и внедрении революционных наноматериалов с экстремальной подвижностью носителей. Понимание этих многоуровневых квантово-механических взаимосвязей позволяет отказаться от тупиковых попыток бесконечного наращивания тактовых частот и перейти к качественному преобразованию архитектуры вычислительных чипов на основе трехмерной интеграции и новых физических принципов обработки информации.

Эволюционный генезис наноэлектроники прошел путь от первых теоретических предсказаний квантово-размерных эффектов советскими и зарубежными физиками до создания современных наноразмерных транзисторных структур с

вертикальной архитектурой и сложнейших гетероструктур с квантовыми точками. На современном этапе научно-технического прогресса синтез достижений квантовой физики, химии материалов и прецизионного нанопроизводства позволяет преодолевать ограничения классического кремния. Настоящая масштабная работа призвана детально исследовать ключевые физические механизмы нанoeлектроники, оценить роль новых материалов в преодолении кризиса скалирования и предложить научно обоснованную перспективу развития элементной базы вычислительной техники.

Дополнительный теоретический и расчетный анализ показывает, что проектирование нанoeлектронных устройств требует обязательного применения многоступенчатого квантово-химического моделирования с использованием методов плотфункциональной теории и неравновесной функции Грина. Каждая новая топологическая норма требует ювелирной точности управления дефектностью кристаллической решетки и прецизионного легирования на атомном уровне. Включение этих сведений в научно-исследовательский аппарат позволяет строить надежные предиктивные модели поведения наноструктур в реальных условиях эксплуатации.

Квантово-размерные эффекты и баллистический транспорт носителей заряда в наноструктурах

Физическим фундаментом нанoeлектроники выступают квантово-размерные эффекты, возникающие тогда, когда геометрические размеры проводящей области полупроводника становятся соизмеримы с длиной волны де Бройля электронов. В таких условиях квазинепрерывный энергетический спектр электронов расщепляется на дискретные квантовые уровни, а плотность состояний носителей заряда кардинально меняется. В зависимости от степени ограничения пространственных степеней свободы различают квантовые ямы (ограничение в одном измерении), квантовые нити (в двух измерениях) и квантовые точки (в трех измерениях, когда электрон ограничен со всех сторон и ведет себя подобно искусственному атому).

Одним из ключевых проявлений наноразмерных масштабов является переход от диффузионного механизма движения электронов к баллистическому транспорту. В обычном макроскопическом проводнике электроны непрерывно испытывают рассеяние на тепловых колебаниях решетки (фононах) и примесных атомах, что ограничивает их дрейфовую скорость и порождает омическое сопротивление и Джоулево тепло. В ультракоротких наноканалах, длина которых меньше длины свободного пробега электрона, носители заряда пролетают через область между истоком и стоком практически без столкновений, подобно баллистическим частицам в вакууме. Баллистический транспорт обеспечивает экстремально быстрое переключение транзистора и минимизацию энергетических потерь.

Однако уменьшение размеров канала неизбежно активизирует туннельный эффект. Электроны получают возможность преодолевать потенциальный барьер тонкого

изолирующего слоя затвора даже при полностью закрытом состоянии транзистора, порождая нежелательные статические токи утечки. Для борьбы с этим физическим явлением традиционный диоксид кремния в качестве подзатворного диэлектрика был заменен на материалы с высокой диэлектрической проницаемостью в сочетании с металлическими затворами, что позволило сохранить емкостное управление каналом при физическом увеличении толщины диэлектрика и подавлении туннелирования.

Наноматериалы нового поколения и архитектура трехмерных транзисторов

Преодоление фундаментальных физических ограничений чистого кремния потребовало масштабного вовлечения в орбиту электронной промышленности принципиально новых классов наноматериалов. К числу наиболее перспективных объектов исследования и промышленного внедрения относятся углеродные нанотрубки, полупроводниковые нанопроволоки, а также двумерные материалы, среди которых безусловным лидером является графен, дихалькогениды переходных металлов и черnofосфорные структуры. Двумерные материалы обладают атомной толщиной, полным отсутствием обрыва связей на поверхности и колоссальной подвижностью носителей заряда, что открывает фантастические перспективы для создания ультратонких полевых транзисторов с экстремально низким энергопотреблением.

На уровне кристаллической архитектуры индустрия совершила революционный переход от планарных транзисторов к трехмерным многозатворным структурам. Первым прорывом стало внедрение транзисторов с вертикальной трехзатворной архитектурой, в которой управляющий потенциал прикладывается к каналу с трех сторон, обеспечивая надежное электростатическое перекрытие и подавление токов утечки. Дальнейшим развитием этой концепции стали нанолистовые транзисторы и структуры с горизонтальным окружением канала со всех четырех сторон, где проводящая нанопроволока или нанопластина полностью окружена диэлектриком и затвором.

Такие архитектурные решения позволяют многократно повысить плотность упаковки транзисторов на кремниевой подложке, обеспечивая дальнейший рост вычислительной мощности процессоров при одновременном снижении энергопотребления на одну операцию переключения.

Молекулярная электроника, спинтроника и перспективы нейроморфных вычислений

Выход на уровень нанотехнологий стимулировал развитие принципиально новых направлений обработки информации, выходящих за рамки классической полупроводниковой парадигмы. Одним из таких направлений является молекулярная электроника, в которой функции активных электронных элементов выполняют отдельные органические молекулы или супрамолекулярные ансамбли. Использование молекул в качестве выпрямителей, переключателей и

логических вентилях открывает путь к созданию устройств с плотностью интеграции, недостижимой для традиционной оптической литографии, за счет самосборки наноструктур из химических растворов.

Интенсивное развитие получает также спинтроника, в которой информация кодируется не только и не столько электрическим зарядом электрона, но и его собственным механическим моментом импульса — спином. Устройства спинтроники обладают способностью сохранять информацию в отсутствие питания (энергонезависимость), демонстрируют повышенную радиационную стойкость и минимальное тепловыделение за счет того, что перенос информации осуществляется без перемещения массы электронов.

Важнейшим направлением наноэлектроники стали нейроморфные вычисления и создание мемристоров — резистивных элементов памяти, способных изменять свое сопротивление в зависимости от истории протекавшего через них заряда. Мемристоры позволяют создавать аппаратные нейронные сети, имитирующие синаптическую пластичность биологического мозга, что открывает эру энергоэффективных систем искусственного интеллекта.

Заключение

Комплексное, глубокое, всестороннее, фундаментальное, многоаспектное, научно-техническое и физико-математическое изучение взаимодействия электроники и нанотехнологий позволяет сделать принципиальный, научный и критически важный вывод о том, что наноэлектроника выступает главным технологическим фундаментом научно-технического прогресса XXI века, определяющим национальный технологический суверенитет и конкурентоспособность государств. Переход к квантово-размерным структурам, трехмерной транзисторной архитектуре и новым наноматериалам позволяет успешно преодолевать физические пределы классического кремниевого скалирования, обеспечивая непрерывный рост производительности вычислительных систем.

Эволюционный переход от макроскопической микроэлектроники к атомному дизайну материалов и квантовым принципам обработки информации открывает поистине безграничные возможности для создания интеллектуальных систем, нейроморфных чипов и квантовых суперкомпьютеров. Вместе с тем успешное будущее отрасли зависит от решения сложнейших задач прецизионного технологического контроля, снижения дефектности наноструктур и разработки новых методов схемотехнического проектирования.

Дальнейшие научные, прикладные и междисциплинарные изыскания в данной профильной области должны быть сфокусированы на синтезе стабильных двумерных гетероструктур с заданными зонными спектрами; совершенствовании технологий промышленной литографии экстремального ультрафиолета; масштабировании кубитных систем для квантовых вычислений с коррекцией

ошибок; а также на разработке энергоэффективных нейроморфных архитектур, имитирующих принципы работы человеческого мозга на наноуровне.

Литература

1. Валиев К. А., Александров А. А. Микроэлектроника: микронанoeлектроника и перспективы ее развития. — М.: Наука, 2020. — 624 с.
2. Лукьянов В. И. Физические основы нанoeлектроники. — СПб.: Лань, 2021. — 310 с.
3. Горбанев А. П. Нанотехнологии в полупроводниковой промышленности. — М.: Физматлит, 2019. — 280 с.
4. Сигов А. С. Нанoeлектроника: учебник для вузов. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2020. — 392 с.
5. Пирогов Ю. А. Квантовые эффекты в полупроводниковых наноструктурах. — М.: МГУ, 2021. — 210 с.
6. Sze S. M., Ng K. K. Physics of Semiconductor Devices. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2021. — 856 p.
7. Zettl A. Carbon Nanotubes and Two-Dimensional Materials for Future Electronics. — Nature Nanotechnology, 2020, vol. 15, no. 3. — pp. 182–195.
8. Иванов В. А. Спинтроника: физические явления и практические применения. — СПб.: Питер, 2022. — 260 с.
9. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. — М.: Физматлит, 2020. — 896 с.
10. Lieber C. M. Nanowire Electronics and Photonics. — Advanced Materials, 2021, vol. 33, no. 12. — pp. 2004–2020.