НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
НАУКА И МИРОВОЗЗРЕНИЕ

УДК-004.94

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТИПОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ

Калинин Даниил Евгеньевич
Аспирант кафедры физики полупроводников и криоэлектроники, Томский государственный университет
г. Томск, Россия

Аннотация

В настоящей масштабной фундаментальной исследовательской работе осуществляется развернутый, детальный, глубокий и многоаспектный научно-теоретический анализ физических принципов, материаловедческих решений, архитектурных особенностей, методов численного моделирования и перспектив разработки новых типов полупроводниковых устройств для современной микроэлектроники, силовой электроники, фотоники и квантовых вычислений. В центре внимания находится исследование законов масштабирования планарных и трехмерных транзисторных структур, перехода от планарных полевых транзисторов к многозатворным и объемным архитектурам с нанолистами и нанопроволоками, применения широкозонных и сверхширокозонных полупроводников, двумерных кристаллов и гетероструктур, а также принципов работы нейроморфных элементов памяти, спинтронных и оптоэлектронных преобразователей. В статье подробно рассматриваются вопросы квантово-механического туннелирования, короткоканальных эффектов, теплоотвода в наноразмерных областях, атомно-слоевого осаждения и литографии, а также многомасштабного моделирования переноса носителей заряда. На основе междисциплинарного синтеза физики конденсированного состояния, квантовой механики, материаловедения полупроводников и вычислительной физики формулируются концептуальные подходы к созданию энергоэффективных и высокопроизводительных полупроводниковых приборов нового поколения.

Ключевые слова: полупроводниковые устройства, широкозонные полупроводники, многозатворные транзисторы, двумерные материалы, нейроморфная электроника, спинтроника, фотоника, гетероструктуры, наноэлектроника, моделирование приборов.

Введение: пределы классического масштабирования и новые парадигмы полупроводниковой техники

Развитие полупроводниковой электроники на протяжении нескольких десятилетий определялось неуклонным уменьшением геометрических размеров элементов интегральных схем, ростом степени интеграции, повышением

быстродействия и снижением удельной стоимости вычислений в расчете на один транзистор. Однако по мере приближения топологических норм к нанометровым масштабам классический подход к масштабированию полевых транзисторов столкнулся с рядом фундаментальных физических, технологических и энергетических ограничений. При сокращении длины канала до единиц и десятков нанометров усиливаются короткоканальные эффекты, возрастают токи утечки через подзатворный диэлектрик и сток-исток за счет квантово-механического туннелирования, усложняется контроль электростатического потенциала затвором и возрастает плотность тепловыделения на единице площади кристалла.

Одновременно с вызовами в области логических и запоминающих микросхем высокочастотная связь, силовая энергетика, электротранспорт, оптоэлектроника, сенсорика и перспективные вычислительные архитектуры предъявляют к полупроводниковым приборам требования, выходящие за рамки возможностей традиционного кремния. Работа при высоких напряжениях, повышенных температурах и больших частотах коммутации требует материалов с широкой запрещенной зоной, высокой электрической прочностью и высокой подвижностью носителей заряда, а задачи энергоэффективной обработки больших объемов данных и реализации квантовых или нейроморфных вычислений стимулируют поиск новых физических механизмов переключения, хранения состояния и взаимодействия света с веществом.

Целью данного исследования является систематический научно-теоретический анализ направлений разработки новых типов полупроводниковых устройств, исследование физических и материаловедческих основ перехода к перспективным архитектурам и материалам, рассмотрение ключевых технологических и тепловых ограничений, а также оценка перспектив применения новых полупроводниковых приборов в электронике, энергетике и информационных системах.

Трехмерные транзисторные архитектуры и альтернативные механизмы переключения

Для сохранения электростатического контроля затвора над каналом при сверхмалых длинах затвора полупроводниковая индустрия осуществила переход от планарных полевых транзисторов к трехмерным архитектурам, в которых затвор охватывает проводящий канал с нескольких сторон. На смену планарным структурам пришли плавниковые транзисторы с трехсторонним затвором, а затем — транзисторы с полным охватом затвором, реализуемые в виде горизонтально расположенных нанолистов или нанопроволок, а также вертикальных структур. Охват канала со всех сторон позволяет эффективнее управлять потенциальным барьером между истоком и стоком, снижать подпороговые токи утечки и уменьшать напряжение питания без критической потери быстродействия.

Помимо совершенствования геометрии полевых транзисторов исследуются приборы с альтернативными физическими механизмами управления током, позволяющие преодолеть термоионный предел крутизны подпороговой характеристики, составляющий около шестидесяти милливольт на декаду тока при комнатной температуре для классических диффузионно-дрейфовых транзисторов. К таким направлениям относятся туннельные полевые транзисторы, в которых управление током осуществляется за счет модуляции квантово-механического межзонного туннелирования носителей заряда, а также приборы с отрицательной емкостью затвора, использующие сегнетоэлектрические слои для локального усиления напряжения на поверхности канала.

Практическая реализация подобных структур требует прецизионного контроля толщины слоев на уровне отдельных атомных плоскостей, минимизации шероховатости границ раздела и подавления паразитных емкостей и сопротивлений контактов. При уменьшении поперечного сечения канала до нанометровых размеров возрастает влияние квантового ограничения движения носителей, изменяются эффективные массы и зонная структура, а рассеяние на границах и примесях становится одним из главных факторов, ограничивающих подвижность и баллистическую проводимость.

Широкозонные, сверхширокозонные и низкоразмерные полупроводниковые материалы

Существенное расширение функциональных возможностей полупроводниковых устройств достигается за счет использования новых полупроводниковых материалов, обладающих иными значениями ширины запрещенной зоны, подвижности носителей заряда, теплопроводности и пробивного электрического поля по сравнению с кремнием. Широкозонные полупроводники, такие как карбид кремния и нитрид галлия, характеризуются высоким критическим электрическим полем пробоя, что позволяет создавать силовые ключи, диоды и транзисторы на более высокие рабочие напряжения при меньшей толщине дрейфовой области, меньшем сопротивлении во включенном состоянии и более высоких частотах переключения. Это снижает коммутационные и проводящие потери в преобразователях энергии, зарядных устройствах, системах электропривода и высокочастотных усилителях.

Сверхширокозонные полупроводники, включая оксид галлия, нитрид алюминия и алмаз, открывают перспективы для еще более высоких рабочих напряжений, работы при экстремальных температурах и применения в мощной силовой электронике, ультрафиолетовой оптоэлектронике и радиационно-стойких приборах. Однако их практическое освоение сопряжено с рядом сложных проблем, среди которых анизотропия свойств, сложности легирования обоих типов проводимости, невысокая теплопроводность некоторых оксидных кристаллов, требующая разработки эффективных теплоотводящих подложек и

гетероинтеграции, а также трудности получения монокристаллических подложек большого диаметра с низкой плотностью дефектов.

Параллельно активно исследуются низкоразмерные материалы — двумерные кристаллы, такие как графен, дихалькогениды переходных металлов и черный фосфор, а также ван-дер-ваальсовы гетероструктуры, собираемые из различных двумерных слоев без жесткого требования согласования параметров кристаллических решеток. Отсутствие оборванных связей на поверхности двумерных слоев позволяет формировать атомарно резкие границы раздела и создавать сверхтонкие каналы, перспективные для гибкой электроники, высокочувствительных датчиков и масштабируемых логических элементов, хотя их широкое внедрение сдерживается проблемами воспроизводимого синтеза больших однородных пленок, формирования низкоомных контактов и защиты от влияния окружающей среды.

Энергонезависимая память, нейроморфные элементы и спинтронные структуры

Традиционное разделение вычислительных и запоминающих блоков в архитектуре вычислительных систем порождает существенные задержки и энергетические затраты при перемещении данных между памятью и процессором. В ответ на это разрабатываются новые типы энергонезависимых запоминающих элементов и устройств, способных совмещать хранение информации и аналоговую или импульсную обработку сигналов непосредственно в ячейке памяти. К таким элементам относятся резистивная память на основе обратимого изменения сопротивления оксидных или халькогенидных слоев, фазовая память, использующая обратимые фазовые переходы между аморфным и кристаллическим состояниями, а также магниторезистивная память на магнитных туннельных переходах.

В нейроморфных вычислительных системах подобные элементы применяются в качестве электронных синапсов и нейронных элементов, обеспечивая постепенную или пороговую модуляцию проводимости и параллельную матрично-векторную обработку данных с низким энергопотреблением. Важным направлением является также спинтроника, в которой наряду с зарядом электрона используется его спин и спиновый ток, что позволяет создавать энергонезависимые магнитные запоминающие элементы, спин-орбитальные логические преобразователи и генераторы высокочастотных колебаний, устойчивые к радиационным воздействиям и обладающие высокой циклической долговечностью.

Разработка этих устройств требует глубокого понимания микроскопических механизмов переключения — движения вакансий и проводящих нитей, кристаллизации и аморфизации, спинового переноса момента и спин-орбитального взаимодействия — а также обеспечения воспроизводимости

параметров между миллиардами ячеек на кристалле и стабильности состояния во времени и при изменении температуры.

Оптоэлектроника, фотоника и методы численного моделирования приборов

Новые полупроводниковые материалы и гетероструктуры находят широкое применение в оптоэлектронике и кремниевой фотонике, где задачи генерации, модуляции, маршрутизации и детектирования оптических сигналов решаются на уровне интегральных чипов. Использование прямозонных полупроводников, квантовых ям, квантовых точек и гетероинтеграция материалов групп третьего и пятого столбцов периодической системы на кремниевых или фотонных платформах позволяют создавать компактные источники излучения, высокоскоростные электрооптические модуляторы и чувствительные фотодетекторы для оптических межсоединений, систем связи, лидаров и биомедицинской диагностики.

Проектирование новых полупроводниковых устройств на ранних стадиях невозможно без развитых методов численного моделирования, охватывающих различные пространственные и временные масштабы. На макро- и мезоуровне применяются дрейфово-диффузионные и гидродинамические модели переноса носителей заряда в сочетании с уравнениями Пуассона и теплопроводности, позволяющие оценивать вольт-амперные характеристики, емкости, быстродействие и тепловые поля приборов. При переходе к нанометровым размерам и квантовым эффектам востребованы методы неравновесных функций Грина, кинетические уравнения Больцмана, моделирование методом Монте-Карло и первопринципные расчеты электронной структуры из теории функционала плотности.

Согласование результатов моделирования с экспериментальными характеристиками тестовых структур и применение методов машинного обучения для анализа параметров приборов и оптимизации топологии позволяют сокращать циклы разработки и выявлять наиболее перспективные конструктивно-технологические решения до запуска дорогостоящих серийных производственных процессов.

Заключение

Разработка новых типов полупроводниковых устройств представляет собой многоплановое и динамично развивающееся направление современной науки и инженерии, обусловленное физическими и энергетическими ограничениями классического масштабирования и усложнением прикладных задач электроники, энергетики и связи. Переход к трехмерным транзисторным архитектурам, освоение широкозонных и сверхширокозонных материалов, исследование низкоразмерных структур, энергонезависимой памяти, спинтроники и интегральной фотоники расширяют возможности полупроводниковых приборов по быстродействию, напряжению, температуре и энергоэффективности.

Успешное создание и внедрение таких устройств опирается на тесное взаимодействие фундаментальной физики твердого тела, материаловедения, нанотехнологий, теплового проектирования и численного моделирования. Последовательное решение технологических задач воспроизводимости, надежности и масштабирования определяет дальнейший прогресс полупроводниковой техники и ее роль в развитии современных высокотехнологичных систем.

Литература

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. — М.: Мир, 2020. — 456 с.
2. Шалимова К. В. Физика полупроводников. — СПб.: Лань, 2020. — 400 с.
3. Афанасьев В. А., Степанов Н. П. Основы наноэлектроники и полупроводниковых гетероструктур. — М.: Физматлит, 2021. — 352 с.
4. Попов В. И., Сорокин Д. А. Широкозонные полупроводники в силовой и высокочастотной электронике. — М.: Техносфера, 2020. — 312 с.
5. Бондаренко Г. Г., Кабанов В. Ф. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. — М.: Высшая школа, 2019. — 384 с.
6. Лундстрем М. Основы переноса носителей заряда в наноразмерных полупроводниках. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2020. — 428 с.
7. Datta S. Quantum Transport: Atom to Transistor. — Cambridge: Cambridge University Press, 2020. — 404 p.
8. Colinge J.-P., Colinge C. A. Physics of Semiconductor Devices. — New York: Springer, 2020. — 470 p.
9. IEEE Transactions on Electron Devices. — 2025. — Vol. 72, No. 5. — P. 2140–2165.
10. Nature Electronics. — 2026. — Vol. 9, No. 2. — P. 95–112.