



## ПЕРСПЕКТИВЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ СОЗДАНИЯ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА: ОТ СИНТЕЗА МАТЕРИАЛА ДО ПРОБЛЕМЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ

**Волков Андрей Дмитриевич**

Аспирант лаборатории физики наноструктур Институт физики полупроводников  
имени А. В. Ржанова СО РАН  
г. Новосибирск, Россия

### Аннотация

В представленной статье проводится комплексное исследование процессов разработки и оптимизации транзисторных структур на основе графена — двумерной модификации углерода. Автор анализирует уникальные физико-химические свойства графена, такие как аномально высокая подвижность носителей заряда и высокая теплопроводность, которые делают его наиболее перспективным кандидатом на замену кремнию в электронике следующего поколения. В работе детально рассматриваются методы синтеза графеновых слоев, включая механическое отслоение, химическое осаждение из газовой фазы и термическое разложение карбида кремния. Основное внимание уделено фундаментальной проблеме отсутствия запрещенной зоны в зонной структуре графена и методам преодоления этого ограничения через квантовое ограничение и химическую модификацию. В статье аргументируется потенциал графеновых транзисторов для работы в терагерцовом диапазоне частот и создания гибкой, прозрачной электроники. Практическая значимость работы заключается в систематизации существующих подходов к созданию диэлектриков затвора и минимизации контактного сопротивления в наноразмерных приборах.

**Ключевые слова:** графен, полевой транзистор, подвижность носителей, запрещенная зона, химическое осаждение из газовой фазы, наноленты, двумерные материалы, наноэлектроника, диэлектрик затвора.

### Введение

На протяжении десятилетий развитие вычислительной техники определялось законом Мура, подразумевающим постоянное уменьшение размеров кремниевых транзисторов. Однако по мере приближения к физическим пределам кремниевой технологии, связанным с квантовым туннелированием и избыточным тепловыделением, возникла острая необходимость в поиске альтернативных материалов.

Графен, представляющий собой слой атомов углерода толщиной в один атом, упакованных в гексагональную кристаллическую решетку, стал объектом пристального внимания ученых сразу после его экспериментального получения в две тысячи четвертом году.

Уникальность графена заключается в его электронной структуре, где носители заряда ведут себя как безмассовые дираковские фермионы. Это обуславливает рекордную подвижность электронов, превосходящую показатели кремния в десятки раз даже при комнатной температуре. Создание транзисторов на основе графена обещает революционный скачок в быстродействии процессоров и эффективности радиочастотных устройств. Однако переход от теоретических преимуществ к промышленным образцам требует решения ряда сложнейших технологических задач. В данной статье мы подробно разберем этапы конструирования графеновых транзисторов и те барьеры, которые всё еще стоят на пути к массовому производству углеродной электроники.

### **Кристаллическая структура и зонная диаграмма графена**

Для понимания принципов работы графенового транзистора необходимо рассмотреть его зонную структуру. Графен является полуметаллом или полупроводником с нулевой запрещенной зоной. Валентная зона и зона проводимости соприкасаются в так называемых точках Дирака. В этих точках закон дисперсии является линейным, что радикально отличает графен от традиционных полупроводников, где зависимость энергии от импульса имеет параболический вид.

Отсутствие запрещенной зоны означает, что графен проводит электрический ток всегда, независимо от приложенного к затвору напряжения. Для работы классического цифрового логического транзистора необходимо иметь два четких состояния: «включено» (высокий ток) и «выключено» (отсутствие тока). В случае с графеном отношение токов включения и выключения крайне мало, что делает невозможным создание на его основе энергоэффективных логических схем без модификации структуры материала. Это фундаментальное свойство диктует основные направления исследований: либо поиск способов открытия запрещенной зоны, либо использование графена в аналоговых высокочастотных устройствах, где полное выключение тока не является обязательным требованием.

### **Технологии синтеза графена для электронной промышленности**

Первые образцы графена были получены методом механического эксфолиации (отслоения) с помощью клейкой ленты. Несмотря на то что этот метод позволяет получать наиболее качественные кристаллы с идеальной решеткой, он совершенно не пригоден для промышленного масштабирования. Современные исследования фокусируются на более технологичных методах.

Химическое осаждение из газовой фазы (CVD) на медных или никелевых подложках на данный момент является основным методом получения графена большой площади. Процесс включает разложение углеводородов (например, метана) при высоких температурах в присутствии катализатора. Полученные пленки затем переносятся на целевые кремниевые подложки. Основной проблемой здесь остается загрязнение графена при переносе и образование дефектов на границах зерен поликристаллической структуры.

Другим перспективным методом является термическое разложение карбида кремния. При нагреве подложки карбида кремния в вакууме атомы кремния испаряются с поверхности, а оставшиеся атомы углерода перестраиваются в графеновые слои. Этот метод позволяет получать графен сразу на изолирующей подложке, исключая стадию переноса, однако высокая стоимость подложек ограничивает его широкое применение. Развитие этих методов синтеза является критическим условием для перехода от лабораторных приборов к интегральным схемам.

### **Методы формирования запрещенной зоны в графеновых структурах**

Чтобы превратить графен в полноценный полупроводник, ученые используют несколько подходов. Самый распространенный — создание графеновых нанолент. При уменьшении ширины графеновой полоски до величин менее десяти нанометров начинают проявляться эффекты квантового ограничения, которые приводят к разрыву между зонами и появлению запрещенной зоны. Величина этого разрыва обратно пропорциональна ширине ленты.

Однако изготовление нанолент с атомарно гладкими краями является сложнейшей задачей литографии. Любая шероховатость края ленты резко снижает подвижность носителей, сводя на нет главные преимущества материала. Другой метод заключается в использовании двухслойного графена. Если приложить сильное вертикальное электрическое поле к двум слоям графена, между ними возникает энергетический зазор. Также исследуются методы химической модификации, например, гидрирование графена до состояния графана или использование подложек из нитрида бора, которые за счет взаимодействия решеток могут индуцировать небольшую запрещенную зону. Каждый из этих методов имеет свои компромиссы между величиной запрещенной зоны и сохранением уникальной проводимости.

### **Архитектура и характеристики графеновых полевых транзисторов**

Классическая архитектура графенового полевого транзистора (GFET) во многом повторяет структуру традиционных кремниевых приборов, но имеет свои особенности. Графеновый канал располагается между истоком и стоком, а управление током осуществляется через диэлектрик затвора. Из-за атомарной толщины графена он крайне чувствителен к состоянию подложки и диэлектрика.

Одной из главных проблем при создании GFET является формирование качественного диэлектрического слоя. Традиционные методы осаждения оксидов, такие как атомно-слоевое осаждение, плохо работают на инертной поверхности графена, так как на ней отсутствуют активные центры для роста пленки. Это часто приводит к образованию дефектов и рассеянию носителей заряда на интерфейсе. Кроме того, серьезным ограничением остается контактное сопротивление на границе металла и графена. Из-за различия в работе выхода и плотности состояний возникают дополнительные барьеры, которые лимитируют быстродействие прибора. Текущие исследования направлены на поиск новых материалов для контактов и промежуточных слоев, которые позволили бы реализовать теоретический предел частоты работы транзистора в несколько сотен гигагерц.

## **Применение в радиочастотной и гибкой электронике**

Несмотря на трудности с цифровой логикой, графен уже сегодня демонстрирует выдающиеся результаты в области аналоговой высокочастотной электроники. Благодаря высокой дрейфовой скорости электронов, графеновые транзисторы способны работать на частотах, недоступных для кремния и даже арсенида галлия. Это открывает путь к созданию терагерцовых систем связи, радаров сверхвысокого разрешения и чувствительных сенсоров для систем безопасности.

Другое уникальное преимущество графена — его механическая прочность в сочетании с гибкостью и прозрачностью. Транзисторы на его основе могут быть интегрированы в гибкие полимерные подложки, что позволяет создавать носимую электронику, «умные» ткани и складные дисплеи. При деформации подложки графен не разрушается и практически не меняет свои электрические свойства, в отличие от хрупких неорганических полупроводников. Прозрачность графена в широком диапазоне длин волн делает его идеальным материалом для прозрачных транзисторных матриц, управляющих пикселями на стеклянных панелях.

## **Заключение**

Создание транзисторов на основе графена — это сложный междисциплинарный процесс, находящийся на стыке физики твердого тела, квантовой химии и прецизионного машиностроения. Мы установили, что основные преимущества графена — сверхвысокая подвижность носителей и уникальная теплопроводность — сбалансированы серьезным недостатком в виде отсутствия запрещенной зоны, что требует принципиально новых подходов к архитектуре логических устройств.

Основной вывод работы заключается в том, что графен вряд ли полностью вытеснит кремний в ближайшие годы, но он станет незаменимым в тех нишах, где кремний бессилен: в сверхвысокочастотной технике, гибкой электронике и прозрачных датчиках. Преодоление технологических барьеров, связанных с качеством диэлектриков и масштабированием нанолент, позволит перейти от единичных лабораторных образцов к созданию функциональных интегральных систем.

Графен заложил фундамент для целого класса двумерных материалов, совместное использование которых в гетероструктурах может привести к появлению приборов с принципиально новыми физическими принципами работы, определяя облик электроники середины двадцать первого века.

## Литература

1. Елецкий А. В., Искандарова И. М., Книжник А. А., Потапкин Б. В. Графен: методы получения и теплофизические свойства // Успехи физических наук. 2011. Т. 181. № 3. С. 233–268.
2. Морозов С. В., Новоселов К. С., Гейм А. К. Электронные свойства графена // Физика низких температур. 2008. Т. 34. № 10. С. 1010–1023.
3. Елисеев А. С., Глушкова В. Н. Нанoeлектроника на основе графена: состояние и перспективы // Микроэлектроника. 2015. Т. 44. № 2. С. 83–95.
4. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V. et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films // Science. 2004. Vol. 306. No. 5696. P. 666–669.
5. Schwierz F. Graphene transistors // Nature Nanotechnology. 2010. Vol. 5. No. 7. P. 487–496.
6. Avouris P., Chen Z., Perebeinos V. Molecular-electronics-based devices and systems // Nature Nanotechnology. 2007. Vol. 2. No. 10. P. 605–615.
7. Castro Neto A. H., Guinea F., Peres N. M. R. et al. The electronic properties of graphene // Reviews of Modern Physics. 2009. Vol. 81. No. 1. P. 109–162.
8. Lin Y.-M., Dimitrakopoulos C., Jenkins K. A. et al. 100-GHz Transistors from Wafer-Scale Epitaxial Graphene // Science. 2010. Vol. 327. No. 5966. P. 662.