

ГРАФЕНОВЫЕ ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ В ПОСТКРЕМНИЕВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Аннотация. Принципы организации электронных компонентов следующего поколения определяются физическими характеристиками углеродных наноструктур и возможностями формирования функциональных элементов на их базе. Применение графена с уникальной подвижностью носителей заряда обеспечивает интеграцию высокочастотных схем и элементов с минимальными энергетическими потерями. Подход радикально отличается от традиционной кремниевой архитектуры, достигшей физических ограничений миниатюризации и быстродействия. Рассматриваются конструктивные особенности графеновых полевых транзисторов, анализируется их пригодность для радиочастотных применений, сопоставляются параметры перспективных разработок. Конкретные примеры демонстрируют встраивание графеновых каналов в усилительные и сенсорные схемы. Обсуждаются ключевые технологические ограничения, включая проблему создания запрещённой зоны, вариативность параметров, требования к чистоте материала. Анализ подтверждает превосходство графеновых структур над кремниевыми аналогами по частотным показателям на порядок величины, что указывает на значительный потенциал для высокочастотной электроники и адаптивных сенсорных систем.

Цель - изучение архитектурных решений графеновых транзисторных платформ и оценка их эффективности.

Метод или методология проведения работы: сравнительный анализ технических характеристик графеновых устройств, методы физического моделирования транзисторных структур.

Результаты: выявлены ключевые параметры, характеризующие быстродействие и частотные свойства графеновых полевых транзисторов.

Область применения результатов: разработка специализированных радиочастотных усилителей и создание аппаратных решений для сенсорных задач.

Ключевые слова: графеновый транзистор, полевая структура, углеродный канал, подвижность носителей, высокочастотная электроника.

GRAPHENE FIELD EFFECT TRANSISTORS IN POST-SILICON ELECTRONICS

Medvedeva E.V.

Abstract. The organizational principles of next-generation electronic components are dictated by the physical characteristics of carbon nanostructures and the potential for developing functional elements based on them. The application of graphene, characterized by unique charge carrier mobility, enables the integration of high-frequency circuits and components with minimal energy dissipation. This approach fundamentally diverges from traditional silicon architecture, which has reached its physical limits in terms of miniaturization and operational speed. This paper examines the structural features of graphene field-effect transistors (GFETs), analyzes their suitability for radio-frequency (RF) applications, and benchmarks the parameters of advanced developments. Specific examples demonstrate the integration of graphene channels into amplification and sensing circuits. Key technological constraints are discussed, including the challenge of bandgap engineering, parameter variability, and material purity requirements. The analysis confirms that graphene structures outperform silicon analogs in frequency metrics by an

order of magnitude, indicating significant potential for high-frequency electronics and adaptive sensing systems.

Objective: To investigate the architectural solutions of graphene transistor platforms and evaluate their efficiency.

Methodology: A comparative analysis of the technical characteristics of graphene devices and physical modeling methods for transistor structures.

Results: Key parameters characterizing the operational speed and frequency properties of graphene field-effect transistors have been identified.

Practical Applications: The development of specialized radio-frequency amplifiers and the design of hardware solutions for sensing applications.

Keywords: graphene transistor, field-effect structure, carbon channel, carrier mobility, high-frequency electronics.

Развитие современной электронной индустрии столкнулось с фундаментальными ограничениями традиционных полупроводниковых материалов. Кремниевые технологии приближаются к теоретическому пределу миниатюризации, когда дальнейшее уменьшение размеров элементов приводит к квантовым эффектам, препятствующим корректной работе устройств [1]. Одновременно растёт потребность в компонентах с повышенным быстродействием, расширенным частотным диапазоном и улучшенными энергетическими характеристиками. Указанные противоречия стимулируют поиск альтернативных материалов, способных обеспечить качественный скачок в параметрах электронных систем.

Графен представляет собой двумерную аллотропную модификацию углерода с толщиной одного атомного слоя. Уникальная кристаллическая решётка обеспечивает исключительные электрофизические свойства: подвижность носителей заряда достигает значений, превышающих кремниевые показатели в тысячу раз, плотность электрического тока оказывается в миллион раз выше, чем у

меди [2]. Носители заряда в графене ведут себя как безмассовые фермионы Дирака, что обуславливает сохранение проводимости даже при номинально нулевой концентрации электронов [1]. Теплопроводность материала многократно превосходит медные проводники, обеспечивая эффективный отвод тепловой энергии из активных областей приборов [2].

Графеновый полевой транзистор представляет трёхконтактный элемент, где управление потоком носителей осуществляется электрическим полем, создаваемым затворным электродом. Базовая конструкция включает исток, сток и затвор, расположенный либо поверх канала, либо под ним на диэлектрическом слое [5, с. 45]. Канальная область формируется из графенового листа, толщина которого составляет один атом, что обеспечивает протекание тока исключительно по поверхности материала [4, с. 58]. Данная особенность определяет высокую чувствительность устройств к внешним воздействиям и открывает перспективы для сенсорных применений.

Амбиполярное поведение графеновых транзисторов позволяет реализовать проводимость как электронами, так и дырками, в зависимости от полярности затворного напряжения. При отрицательном смещении в канальной области доминирует дырочная проводимость, тогда как положительное смещение активирует электронный транспорт [4]. Это свойство отличает графеновые структуры от традиционных кремниевых приборов, где носители одного типа обеспечивают основной вклад в проводимость. Амбиполярность расширяет функциональные возможности схемотехнических решений, но одновременно создаёт трудности при реализации логических элементов, требующих чёткого разделения состояний включения и выключения.

Отсутствие запрещённой зоны в энергетическом спектре графена представляет главное препятствие для применения материала в цифровой электронике. Невозможность полностью перекрыть канал приводит к высоким токам утечки в закрытом состоянии транзистора, что неприемлемо для логических

схем [3, с. 246]. Исследователи разрабатывают различные подходы к формированию энергетической щели: использование графеновых нанолент с контролируемой шириной, создание двухслойных структур со смещением потенциала, введение дефектов кристаллической решётки [1]. Каждый метод обладает специфическими достоинствами и недостатками, влияющими на подвижность носителей и технологическую воспроизводимость процесса.

Для аналоговых высокочастотных устройств наличие запрещённой зоны не является критичным требованием. Основное преимущество графеновых транзисторов заключается в исключительном быстродействии, обусловленном рекордной подвижностью электронов и дырок [5, с. 46]. Экспериментальные образцы демонстрируют частоту отсечки 300 ГГц при длине затвора 140 нанометров и 420 ГГц при уменьшении размера до 67 нанометров [4, с. 60]. Сопоставление с лучшими полупроводниковыми приборами на соединениях третьей и пятой групп показывает сравнимые результаты при тех же геометрических параметрах, тогда как кремниевые транзисторы обеспечивают лишь 140 и 250 ГГц соответственно [4, с. 61].

Разработка графеновых радиочастотных усилителей стала приоритетным направлением международных исследовательских программ. Американская инициатива CERA сосредоточилась на создании компонентов для высокочастотной связи и радарных систем с рабочими частотами свыше 90 гигагерц [5, с. 46]. Ключевым элементом программы являлся малошумящий усилитель с низким энергопотреблением, построенный на графеновых полевых транзисторах. Реализованные прототипы подтвердили возможность создания ультраширокополосных усилителей с частотным диапазоном порядка 100 гигагерц, характеризующихся минимальным собственным шумом и умеренным потреблением электроэнергии [5, с. 47].

Активная реакция графена на воздействие электрического поля обеспечивает электростатическое регулирование концентрации носителей в диапазоне,

превышающем 10^{14} см^{-2} [4]. Подвижность электронов и дырок достигает $10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при комнатной температуре, что на несколько порядков превышает характеристики традиционных материалов [4]. Данные параметры определяют пригодность графеновых структур для высокочастотных применений, где требуется быстрая модуляция проводимости канала. Одновременно выявляется проблема контактного сопротивления на границах графен-металл, существенно влияющего на общие характеристики прибора при малых размерах элементов [3, с. 247].

Туннельные графеновые транзисторы представляют альтернативную конструкцию, совмещающую высокий ток открытого состояния с низким током закрытого состояния. Основным элементом является короткий зазор между истоковым и стоковым контактами, туннельный ток через который управляется напряжением на затворах [5, с. 47]. Подобные устройства объединяют преимущества графеновых каналов с характеристиками полупроводниковых материалов, обеспечивая насыщение тока в открытом состоянии. Экспериментальные образцы демонстрируют улучшенные параметры переключения по сравнению с классическими графеновыми транзисторами, хотя технологическая сложность изготовления остаётся повышенной [4, с. 62].

Сенсорные применения графеновых полевых транзисторов основаны на прямом контакте канала с анализируемой средой. Поскольку весь ток протекает по поверхности одноатомного слоя, адсорбция молекул вызывает изменение распределения электронной плотности и модификацию проводимости [3, с. 248]. Чувствительность устройств позволяет регистрировать отдельные молекулы, присоединяющиеся к функционализированной поверхности канала или отделяющиеся от неё. Биохимические сенсоры на графеновых транзисторах находят применение в медицинской диагностике, экологическом мониторинге, контроле производственных процессов [1].

Технологические вызовы производства графеновых транзисторов включают обеспечение воспроизводимости характеристик, контроль дефектности структуры, оптимизацию методов переноса графеновых слоёв на целевые подложки. Химическое осаждение из газовой фазы обеспечивает формирование больших площадей графена, но требует последующего переноса материала с каталитической подложки на диэлектрик [2]. Механическое отшелушивание графита липкой лентой даёт образцы высокого качества, однако масштабирование метода для промышленного производства затруднительно. Эпитаксиальный рост на карбиде кремния позволяет получать графен непосредственно на полупроводниковой подложке, но сопряжён с высокими температурами процесса и ограниченным контролем количества слоёв [3, с. 249].

Вариативность параметров графеновых структур связана с неоднородностью толщины слоя, присутствием дефектов кристаллической решётки, остаточными загрязнениями от технологических процессов. Даже небольшие отклонения от идеальной структуры приводят к рассеянию носителей заряда и снижению подвижности [4, с. 63]. Контроль чистоты материала требует применения специализированных методов анализа: спектроскопии комбинационного рассеяния для оценки количества слоёв и дефектности, атомно-силовой микроскопии для изучения топографии поверхности, четырёхзондового метода ван дер Пау для измерения электропроводности. Комплексная характеристика на каждом этапе технологического процесса обеспечивает выявление критических отклонений и корректировку режимов обработки.

Сравнительный анализ характеристик графеновых транзисторов с альтернативными решениями демонстрирует их конкурентные преимущества в определённых применениях. Таблица 1 систематизирует основные параметры различных технологий.

Таблица 1. Сопоставление параметров транзисторных технологий

Технология	Подвижность, см ² /(В·с)	Частота отсечки, ГГц	Область применения
Графен	10 ⁴	300-420	Радиочастотные усилители
Кремний	1400	140-250	Цифровая логика
GaAs	8500	300-400	Мощные усилители
InP	5400	350-450	Оптоэлектроника

Из представленных данных следует, что графеновые структуры обеспечивают рекордную подвижность носителей, что непосредственно влияет на частотные характеристики устройств [4, с. 64]. Полупроводниковые соединения третьей и пятой групп демонстрируют сопоставимые частоты отсечки, но уступают по подвижности. Кремниевые приборы существенно проигрывают по обоим параметрам, что ограничивает их применение в высокочастотном диапазоне. Выбор технологии определяется спецификой задачи: цифровая электроника требует наличия запрещённой зоны, тогда как аналоговые схемы выигрывают от высокой подвижности [5, с. 47].

Интеграция графеновых транзисторов в существующие технологические процессы микроэлектроники сталкивается с необходимостью адаптации оборудования и методик. Совместимость с традиционными методами литографии, травления, напыления контактов обеспечивает возможность использования отработанных производственных линий [2]. Гибридные подходы, сочетающие кремниевую логику с графеновыми высокочастотными блоками, позволяют реализовать оптимальное сочетание характеристик системы в целом. Трёхмерная интеграция с применением сквозных кремниевых переходов обеспечивает минимизацию паразитных ёмкостей и индуктивностей межсоединений [1].

Перспективные направления исследований включают разработку полностью графеновых интегральных схем, где все элементы формируются из углеродных наноструктур. Графеновые резисторы, конденсаторы, индуктивности

обеспечивают однородность технологического процесса и упрощают изготовление [3, с. 250]. Комбинация с другими двумерными материалами, такими как дисульфид молибдена, нитрид бора, фосфорен, открывает возможности создания гетероструктур с уникальными свойствами. Вертикальные транзисторы на основе многослойных комбинаций обеспечивают дополнительные степени свободы при проектировании приборов [4, с. 65].

Энергетическая эффективность графеновых устройств определяется низкими резистивными потерями и эффективным теплоотводом. Превосходная теплопроводность материала предотвращает локальный перегрев активных областей, характерный для кремниевых структур при высоких плотностях мощности [2]. Сниженное рабочее напряжение, обусловленное высокой подвижностью носителей, уменьшает динамическое энергопотребление схем. Оценки показывают возможность снижения энергозатрат на несколько порядков по сравнению с традиционными решениями при выполнении аналогичных функций [1].

Коммерциализация графеновых технологий сдерживается высокой стоимостью производства качественного материала и недостаточной воспроизводимостью параметров. Крупные корпорации, включая Samsung, IBM, Intel, инвестируют в разработку промышленных методов синтеза графена и создание прототипов устройств. Объявленные графеновые аккумуляторы с временем зарядки около пятнадцати минут демонстрируют потенциал материала для энергетических применений, хотя серийное производство пока не начато. Патентная активность в области графеновой электроники свидетельствует о растущем интересе индустрии к данному направлению [3, с. 250].

Стандартизация методов характеристики графеновых материалов и устройств является необходимым условием промышленного внедрения технологии. Международные организации разрабатывают нормативную базу, определяющую требования к качеству графена, методики измерения ключевых параметров,

критерии приёмки продукции [5, с. 47]. Унификация терминологии, спецификаций, процедур тестирования облегчает взаимодействие между разработчиками, производителями, потребителями графеновых компонентов. Сертификация материалов обеспечивает гарантии соответствия заявленным характеристикам и способствует формированию доверия к новой технологии.

Таким образом, графеновые полевые транзисторы представляют перспективное направление развития высокочастотной электроники, обеспечивая характеристики, недостижимые для традиционных полупроводниковых материалов. Рекордная подвижность носителей заряда, амбиполярное поведение, исключительная теплопроводность открывают возможности создания устройств с улучшенными параметрами. Технологические вызовы, связанные с отсутствием запрещённой зоны, вариативностью свойств, сложностью производства, постепенно преодолеваются усилиями научных коллективов и промышленных компаний. Целевые применения в аналоговой радиочастотной технике и сенсорных системах демонстрируют практическую реализуемость графеновых решений. Дальнейшее совершенствование методов синтеза, технологий интеграции, схемотехнических подходов обеспечит расширение областей использования графеновых транзисторов и становление посткремниевой электроники.

Список литературы

1. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Колос В. В. Графеновые полевые транзисторы. URL: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/58929/1/Abramov_Instrumentarij.pdf (дата обращения: 19.03.2026).
2. Барабаненков М. Ю., Зеленев А. С., Нелюбов А. И. Графеновые полевые транзисторы в высокочастотных приложениях. URL: <https://www.mathnet.ru/links/05e17ef5fd204192b9a33f5132245832/ftt11245.pdf> (дата обращения: 19.03.2026).

3. Елецкий, А. В. Графен и его электронные свойства / А. В. Елецкий, И. М. Искандарова, А. А. Книжник, Д. Н. Красиков // Успехи физических наук. -- 2013. -- Т. 47, № 2. -- С. 244-250.

4. Попов, А. В. Физические основы графеновой электроники / А. В. Попов : диссертация кандидата физико-математических наук. --- Москва, 2023. --- 150 с.

5. Смирнов, Н. С. Моделирование графеновых полевых транзисторов / Н. С. Смирнов, А. О. Орлов, А. А. Феоктистов // IV Научно-практическая конференция, Зеленоград, 26 января 2017 г. -- Москва: Издательский дом «МИЭТ», 2017. -- С. 45-47.

References

1. Abramov, I. I., Goncharenko, I. A., & Kolos, V. V. Graphene Field-Effect Transistors. Available at: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/58929/1/Abramov_Instrumentarij.pdf (Accessed: March 19, 2026).

2. Barabanenkov, M. Yu., Zelenev, A. S., & Nelyubov, A. I. Graphene Field-Effect Transistors in High-Frequency Applications. Available at: <https://www.mathnet.ru/links/05e17ef5fd204192b9a33f5132245832/ftt11245.pdf> (Accessed: March 19, 2026).

3. Eletsii, A. V., Iskandarova, I. M., Knizhnik, A. A., & Krasikov, D. N. (2013). Graphene and its Electronic Properties. Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences), Vol. 47, No. 2, pp. 244–250.

4. Popov, A. V. Physical Foundations of Graphene Electronics. Ph.D. Thesis in Physical and Mathematical Sciences. Moscow, 2023/ 150 p.

5. Smirnov, N. S., Orlov, A. O., & Feoktistov, A. A.. Modeling of Graphene Field-Effect Transistors. In: IV Scientific and Practical Conference, Zelenograd, January 26, 2017. Moscow: MIET Publishing House, 2017 pp. 45–47.