

УДК 620.3:621.382

## УГЛЕРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

*Диковицкая А.О., студент*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Солодухин И.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент*

**Аннотация.** Проведен сравнительный анализ электрических и структурных свойств фуллеренов, углеродных нанотрубок (УНТ) и графена. Рассмотрены их преимущества: ширина запрещенной зоны фуллеренов, рекордная подвижность носителей в УНТ, позволяющая создавать высокочастотные транзисторы, а также уникальная комбинация проводимости и прозрачности графена. Определены наиболее эффективные области применения материалов в нанoeлектронике. Обоснована перспективность углеродных наноматериалов для преодоления физических ограничений кремниевой технологии и создания элементной базы нового поколения.

**Ключевые слова.** Углеродные наноматериалы, фуллерены, углеродные нанотрубки, графен, нанoeлектроника, полевые транзисторы, элементная база.

Современный этап развития микроэлектроники характеризуется приближением к физическим и технологическим пределам. С уменьшением топологических норм (менее 3 нм) начинают доминировать квантово-механические эффекты, возрастают токи утечки и тепловыделение, что делает дальнейшую миниатюризацию по традиционному пути крайне затруднительной. В связи с этим возникает необходимость поиска материалов, способных обеспечить дальнейший прогресс в области вычислительной техники и радиоэлектроники.

Углеродные наноматериалы, включая фуллерены, углеродные нанотрубки (УНТ) и графен, рассматриваются современным научным сообществом как наиболее перспективные кандидаты на роль основы элементной базы нанoeлектроники будущего. Их уникальные электрофизические свойства, обусловленные спецификой  $sp^2$ -гибридизации углерода и размерными эффектами, позволяют преодолеть ограничения, присущие традиционным полупроводникам [2]. Целью данной работы является сравнительный анализ электрических и структурных свойств основных углеродных наноматериалов, а также определение наиболее эффективных областей их применения в современных и перспективных устройствах нанoeлектроники на основе анализа актуальных литературных данных.

**Фуллерены: структурные особенности и электронные свойства.** Фуллерены, в частности наиболее изученная молекула  $C_{60}$ , представляют собой замкнутые сферические структуры, образованные атомами углерода, которые формируют каркас, состоящий из пяти- и шестичленных колец. Эта архитектура придает фуллеренам уникальные химические и физические свойства. С точки зрения электроники, фуллерены проявляют свойства органических полупроводников  $n$ -типа. Ширина их запрещенной зоны составляет 1.5–2 эВ, что позволяет использовать их в оптоэлектронных приложениях [1].

Ключевыми преимуществами фуллеренов являются их способность к молекулярной самосборке и высокая поляризуемость. Это открывает возможности для создания органических полевых транзисторов (OFET), где фуллерены выступают в роли активного слоя. Кроме того, малые размеры молекул (диаметр около 0.7 нм для  $C_{60}$ ) и дискретный характер их энергетического спектра делают их идеальным кандидатом для создания одноэлектронных транзисторов, работающих при комнатной температуре. В таких устройствах перенос единичного заряда контролируется посредством кулоновской блокады, что позволяет достичь сверхнизкого энергопотребления [1]. В фотоэлектрических преобразователях фуллерены используются в качестве акцепторов электронов в комбинации с полимерными донорами, формируя гетеропереходы с высокой эффективностью разделения экситонов. Иллюстрация внутреннего строения фуллерена  $C_{60}$  представлена на рисунке 1.

**Углеродные нанотрубки: металлические и полупроводниковые модификации.** Углеродные нанотрубки (УНТ) представляют собой протяженные цилиндрические структуры, которые можно рассматривать как свернутый в цилиндр графеновый лист. Их электронные свойства определяются хиральностью — геометрическим параметром, задающим способ сворачивания. В зависимости от угла хиральности нанотрубки могут проявлять как металлические (около 1/3 синтезированных трубок), так и полупроводниковые (около 2/3) свойства с шириной запрещенной зоны, обратно пропорциональной диаметру [4].

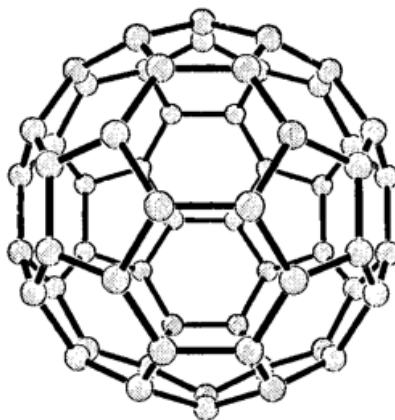


Рисунок 1 – Иллюстрация внутреннего строения фуллерена C<sub>60</sub>

Ключевым преимуществом полупроводниковых УНТ является рекордно высокая подвижность носителей заряда, которая может достигать  $10^5$  см<sup>2</sup>/В·с. Это на порядки превосходит подвижность электронов в кристаллическом кремнии. Высокая подвижность в сочетании с малыми геометрическими размерами позволяет создавать на основе УНТ полевые транзисторы (CNTFET) с низким энергопотреблением и исключительным быстродействием.

Как отмечается в современных обзорах, экспериментальные образцы транзисторов на нанотрубках с длиной затвора 5 нм способны работать на частотах до 8 ГГц, что демонстрирует значительное превосходство над кремниевыми аналогами при сопоставимых топологических нормах [4]. Кроме того, функционализация поверхности нанотрубок позволяет создавать высокочувствительные химические и биологические сенсоры, что расширяет спектр их применения [3]. Иллюстрация внутреннего строения нанотрубок представлена на рисунке 2.

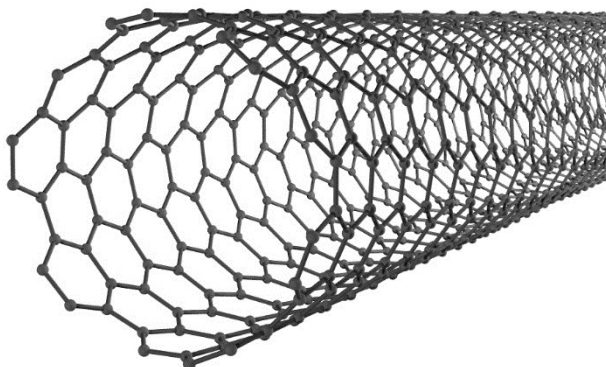


Рисунок 2 – Иллюстрация внутреннего строения нанотрубок

**Графен: двумерный полуметалл и его потенциал.** Графен — это двумерный слой атомов углерода, образующих гексагональную решетку. Он обладает уникальным сочетанием физических свойств: электроны в графене ведут себя как безмассовые дираковские фермионы, что обуславливает аномально высокую подвижность (более  $2 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/В·с), баллистический транспорт на микронных расстояниях, высокую механическую прочность (модуль Юнга  $\sim 1$  ТПа) и оптическую прозрачность (поглощение всего 2.3% видимого света) [2].

Однако, главным ограничением для использования графена в цифровой логике является отсутствие запрещенной зоны. Графен является полуметаллом с нулевой шириной запрещенной зоны, что делает невозможным достижение высокого отношения токов включенного и выключенного состояния ( $I_{on}/I_{off}$ ), необходимого для логических переключателей. Тем не менее, данное ограничение не является критическим для аналоговых и оптоэлектронных применений. Прозрачность и проводимость графена делают его незаменимым материалом для создания прозрачных проводящих электродов в гибких дисплеях, солнечных батареях и сенсорных панелях. В сфере высокочастотной электроники на основе графена создаются аналоговые транзисторы (GFET), способные работать в терагерцовом диапазоне [2]. Его высокая чувствительность к изменениям поверхностного заряда также обеспечивает создание высокочувствительных транзисторов-сенсоров, способных детектировать единичные молекулы [4]. Иллюстрация высокочувствительного графенового транзистора представлена на рисунке 3.

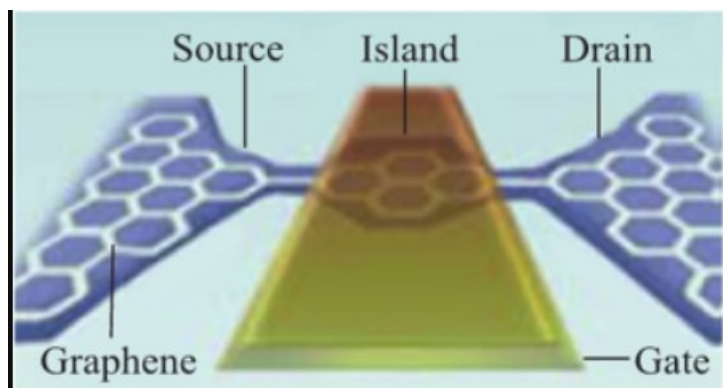


Рисунок 3 – Иллюстрация высокочувствительного графенового транзистора

Проведенный анализ позволяет систематизировать особенности каждого из рассмотренных материалов и определить их ниши в элементной базе будущего. Сравнительный анализ и основные области применения углеродных наноматериалов описаны в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ углеродных наноматериалов и основные области их применения

Материал	Структура	Электронные свойства	Области применения
Фуллерены	0D, замкнутые сферы	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Органический полупроводник n-типа</li> <li>– Низкая подвижность (<math>0,1-1 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}</math>)</li> <li>– Высокая поляризуемость</li> <li>– Эффект кулоновской блокады при комнатной температуре</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Органические полевые транзисторы</li> <li>– Одноэлектронные транзисторы</li> <li>– Фотозлектрические преобразователи</li> <li>– Органические солнечные батареи</li> </ul>
УНТ	1D, цилиндры	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Металлические или полупроводниковые свойства в зависимости от хиральности</li> <li>– Подвижность носителей (до <math>10^5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}</math>)</li> <li>– Высокая плотность тока (<math>&gt; 10^9 \text{ А}/\text{см}^2</math>)</li> <li>– Скорость насыщения носителей <math>10^7 \text{ см}/\text{с}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Высококачественные полевые транзисторы</li> <li>– Гибкая электроника</li> <li>– Химические и биологические сенсоры</li> <li>– Межсоединения в интегральных схемах</li> </ul>
Графен	2D, гексагональная решетка	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Полуметалл с нулевой запрещенной зоной.</li> <li>– Подвижность носителей до <math>2 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}</math></li> <li>– Высокая оптическая прозрачность (97.7%)</li> <li>– Слабая спин-орбитальная связь</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Прозрачные проводящие электроды</li> <li>– Высокочувствительные сенсоры</li> <li>– Высокочастотные аналоговые транзисторы</li> <li>– Гибкая оптоэлектроника</li> </ul>

Сравнение с традиционным кремнием показывает, что углеродные наноматериалы демонстрируют значительное превосходство по ключевым параметрам: подвижности, способности к теплоотводу и возможности масштабирования. Наибольший практический прогресс в настоящее время наблюдается в области создания полевых транзисторов на углеродных нанотрубках. Технология CNTFET уже сейчас демонстрирует конкурентоспособные характеристики, и в ближайшее десятилетие такие транзисторы могут дополнить или заменить кремниевые в нише высокочастотной, гибкой и низкопотребляющей электроники [4].

Графен, несмотря на отсутствие запрещенной зоны, открывает новые возможности в сенсорике и оптоэлектронике. Создание гетероструктур на основе графена и других 2D-материалов (например, дисульфида молибдена) позволяет индуцировать запрещенную зону и расширять функциональность [3]. Фуллерены, в свою очередь, остаются востребованными в молекулярной электронике и при создании органических фотозлектрических элементов, где важны процессы самосборки и низкая стоимость обработки.

**Заключение.** В результате проведенного сравнительного анализа установлено, что углеродные наноматериалы (фуллерены, углеродные нанотрубки и графен) демонстрируют совокупность электрофизических параметров, критически важных для дальнейшего развития нанoeлектроники, которые значительно превосходят характеристики традиционного кремния.

Каждый из материалов имеет свою специфическую нишу: УНТ оптимальны для высокочастотных и энергоэффективных полевых транзисторов; графен незаменим для создания гибкой оптоэлектроники и сверхчувствительных сенсоров; фуллерены обладают наибольшим потенциалом в области молекулярной и органической электроники. Таким образом, углеродные наноматериалы позволяют преодолеть фундаментальные ограничения кремниевой электроники и создать принципиально новую элементную базу для устройств вычислительной техники, радиоэлектроники и сенсорных систем будущего.

**Список использованных источников:**

1. Казаков, В.Д. *Нанотехнологии и наноматериалы в радиоэлектронике: учеб. пособие* / В.Д. Казаков – Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 192 с.
2. *Advances in Nanoelectronics: Carbon Nanotubes, Graphene, and Smart Polymers: A review* [Electronic resource]. Mode of access: <https://tis.wu.ac.th/index.php/tis/article/view/9843>. – Date of access: 09.03.2026.
3. *Functionalization of carbon nanotubes for multifunctional applications* [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589597424000224>. – Date of access: 09.03.2026.
4. *High-Performance Carbon Nanotube Electronic Devices: Progress and Challenges* [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.mdpi.com/2072-666X/16/5/554/>. – Date of access: 09.03.2026.

UDC 620.3:621.382

## CARBON MATERIALS IN NANOELECTRONICS

*Dikovitskaya A.O., student*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Saladukhin I.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor*

**Annotation.** A comparative analysis of the electrical and structural properties of fullerenes, carbon nanotubes, and graphene is conducted. Their advantages are discussed: the band gap width of fullerenes, the record-breaking carrier mobility in CNTs, which enables the creation of high-frequency transistors, and the unique combination of conductivity and transparency of graphene. The most effective applications of these materials in nanoelectronics are identified. The potential of carbon nanomaterials for overcoming the physical limitations of silicon technology and creating next-generation electronic components is substantiated.

**Keywords.** Carbon nanomaterials, fullerenes, carbon nanotubes, graphene, nanoelectronics, field-effect transistors, electronic components.