

**НАНОАНТЕННА НА ОСНОВЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО
РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА**

Ю.И. Бохан

Витебск, Витебский филиал УО «Белорусская Государственная академия связи»

Применение углеродных нанотрубок для целей генерации/приема электромагнитного излучения терагерцевого диапазона привлекает все большее внимание ввиду высокой степени миниатюризации и возможности создания высокочувствительных приемных устройств [1–3]. Резонансное туннелирование и эффект отрицательной дифференциальной проводимости в наноструктурах вызваны чисто квантовыми явлениями пространственного квантования, приводящего к возникновению резонансных энергетических уровней. Такие эффекты дают возможность проявления новых свойств наноматериалов [4].

Результаты и их обсуждение. Использование углеродных нанотрубок (УНТ) представляется перспективным для целей детектирования переменных полей в диапазоне терагерц из-за спектральных особенностей УНТ. Это связано с тем фактом, что однослойные УНТ имеют различный вид спектра в зависимости от хиральности трубки. Хиральность УНТ определяет симметрию расположения атомов углерода и структуру УНТ (рисунок 1)

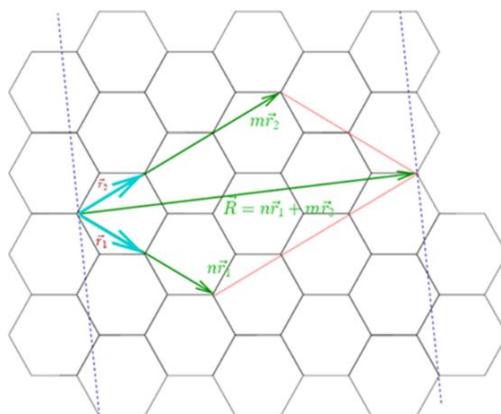


Рисунок 1 – Определение индексов хиральности однослойной нанотрубки

Индексы хиральности однослойной нанотрубки (m , n) однозначным образом определяют ее диаметр D :

$$D = \sqrt{3(m^2 + n^2 + nm)} d_0/\pi, \quad (1)$$

где $d_0 = 0,142$ нм — расстояние между соседними атомами углерода в графитовой плоскости. При этом нанотрубки различной хиральности имеют собственные названия:

- а) $\alpha = 0$ (armchair конфигурация),
- б) $\alpha = 30^\circ$ (zigzag конфигурация),
- в) трубка с хиральностью (10, 5)

Для различных УНТ зонная структура спектра имеет различный вид (рисунок 2):

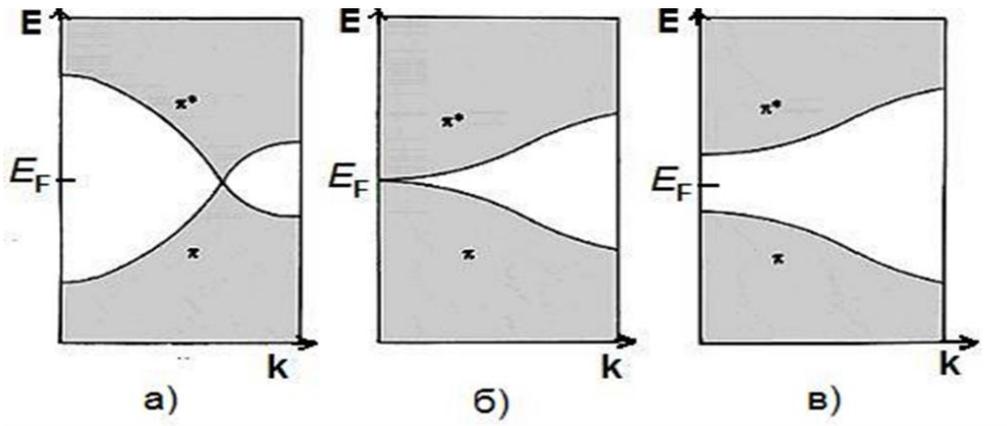


Рисунок 2 – Зонная структура нанотрубки в зависимости от индекса хиральности.
 а) трубки (n, n) металлические; б) трубки $(n, 0)$ металлические, если n кратно 3;
 в) полупроводниковые трубки $(n, 0)$, n не кратно 3.

Для таких видов спектра была показано [5], что УНТ имеют свои особенности в квантовых свойствах.

Известно, что проводимость по постоянному току для узкого проводника (в отсутствие рассеивания по его длине) квантуется с учётом спинового момента электронов в единицах $2e^2/h$ [5]. В пересчёте на сопротивление, как отмечено в [5], $h/(2e^2) \approx 12,9$ кОм.

Кинетическая индуктивность для одномерных волноводных систем, канализирующих электронные волны, в пересчёте на единицу длины проводника описывается упрощённой квантованной зависимостью [5]:

$$L_k = \frac{h}{2e^2 v_f}, \quad (2)$$

где h – постоянная Планка, v_f – скорость Ферми для носителей заряда, e – заряд электрона. Для углеродных нанотрубок величина $v_f = 8 \cdot 10^5$ м/с, соответственно, и удельная линейная (погонная) квантовая индуктивность составит $L_k = 16$ нГ/мкм.

Аналогично, применительно к одномерному случаю нанотрубок, квантовая ёмкость на единицу длины определяется как

$$C_q = \frac{2e^2}{h v_f} \quad (3)$$

При скорости Ферми для графена и углеродных нанотрубок $v_f = 8 \cdot 10^5$ м/с удельная квантовая ёмкость составляет величину порядка 100 аФ/мкм.

Считая, что длина УНТ составляет величину порядка 10 мкм, для резонансной частоты антенны из микроскопических проводников, получим [6] значение порядка 1 ТГц.

Следует отметить, что рассчитанная таким образом резонансная частота имеет достаточно условный характер, так как не учитывает другие процессы, происходящие при поглощении внешнего электромагнитного поля. Например, при наличии нескольких, расположенных на определённом расстоянии друг от друга УНТ, необходимо учитывать погонную индуктивность и ёмкость двух и более проводников в линии. Все это делает приведённую выше оценку по порядку величины.

С другой стороны, ранее было показано [7], что УНТ представляет туннельный цилиндрический барьер, обладающий интересным спектром состояний. Было получено, что спектр состояний определяется корнями функций Бесселя:

$$E_{ik} = U_0 + \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\mu_i^2}{R^2} + \frac{k^2}{L^2} \right), \quad (4)$$

где $\mu^2 = [2m (E - U_0)/\hbar^2] - \frac{k^2}{L^2}$, $J_n(x)$ – функция Бесселя целого индекса, μ_i – действительные корни уравнения $J_n(\mu_i R) = 0$, $n, m, k = 0, 1, 2, 3, \dots$, R – радиус УНТ, L – её длина.

Если определить частоту для разности состояний с большими индексами, то из-за перемежаемости корней функций Бесселя, можно найти состояния с частотами порядка нескольких терагерц. Этот факт позволяет высказать предположение, что состояния УНТ как цилиндрического барьера определяют квантовые индуктивность и ёмкость УНТ.

Кроме того, движения тока через состояния с большими значениями n и m , из-за свойства перемежаемости корней уравнения $J_n(kR) = 0$, даёт возможность управления частотной зависимостью тока от внешнего поля. Действительно, разность величин E_{nm} для различных значений n и m , неявно, через зависимость корней от высоты потенциального барьера, определяется и величиной приложенного поля. Это даёт возможность дополнительной настройки в резонанс, которая может быть осуществлена подстройкой «продольной» составляющей тока, зависящей от длины нанотрубки.

Заключение. Предложенная интерпретация появления квантовых индуктивности и ёмкости УНТ носит качественный характер. С другой стороны, она позволяет высказать соображения о физическом механизме появления таких свойств УНТ.

1. Дьячков П.Н. Электронные свойства и применение нанотрубок / П.Н. Дьячков. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 488с.
2. Handbook of Carbon Nanotubes. / Ed. Jiji Abraham, Sabu Thomas, Nandakumar Kalarikkal / Springer Nature. Switzerland AG. 2022. 2112 P./DOI:10.1007/978-3-030-91346-5
3. Hans G. Schants The Art and Science of Ultrawideband Antennas / Artech House. London. 2015. 593 p.
4. Семенов В.Л., Лейман В.Г., Арсенин А.В., Стебунов Ю.В., Рыжий В.И. Система из двух углеродных нанотрубок как антенна и детектор терагерцевого излучения // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – № 6. – с. 2–15.
5. Burke P.J., Li S., Yu Z. Quantitative Theory of Nanowire and Nanotube Antenna Performance / arXiv: cond – mat/0408418v1. 2004. P. 15.
6. Monsen Razavy Quantum theory of tunnelling / 2nd Edition. World Scientific Publishing Co. – 2014. – 792 p.
7. Бохан Ю.И. Особенности протекания тока в цилиндрическом барьере // Материалы 76-й Региональной научно-практической конференции преподавателей, научных сотрудников и аспирантов, Витебск, 1 марта 2024 г. / Витеб. гос. ун-т; редкол.: Е.Я. Аршанский (гл. ред.) [и др.]. – Витебск: ВГУ имени П.М. Машерова, 2024. с. 19–21.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССОВОЙ ДОЛИ СЫРОЙ КЛЕТЧАТКИ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

*А.Э. Бувевич, Т.В. Бувевич
Витебск, ВГУ имени П.М. Машерова*

Интеграционные процессы в экономике и науке требуют согласования требований стандартов, что особенно актуально в области метрологии. В соответствии с национальным стандартом СТБ ИСО/МЭК 17025–2007 [1], базирующемся на международном стандарте ISO/IEC 17025, при аккредитации испытательных и калибровочных лабораторий обязательным условием является представление оценки неопределенности при определении содержания веществ.

Цель исследования – разработать алгоритм определения массовой доли сырой клетчатки по ГОСТ 31675-2012 [2] с учетом неопределенности измерений.

Материал и методы. Разработан и реализован алгоритм определения массовой доли сырой клетчатки согласно пункту 7 [2]. Методика основана на последовательной обработке навески испытуемой пробы растворами кислоты и щелочи, озоления вещества и количественном определении органического остатка весовым методом, который