

КИНЕТИЧЕСКАЯ ИНДУКТИВНОСТЬ ОДНОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТИПА

О.С. Еркович

erkovic@bmstu.ru

П.А. Ивлиев

ivliev-pavel@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представлены результаты теоретического исследования кинетической индуктивности L_k одностенной углеродной нанотрубки металлического типа с учетом межэлектронного взаимодействия в приближении прямого кругового цилиндра. Рассматриваемая система является цилиндрически симметричной потенциальной ямой с конечной высотой стенок. В рамках теории отклика двумерного электронного газа на внешнее электромагнитное возмущение получен явный вид зависимости кинетической индуктивности от диаметра нанотрубки, частоты и интенсивности излучения. Установлено, что величина L_k возрастает с увеличением частоты и уменьшается с усилением интенсивности излучения

Ключевые слова

Углеродные нанотрубки, кинетическая индуктивность, электронная плотность

Поступила в редакцию 15.11.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

В процессе изучения осадка, образующегося на катоде при распылении графита в вольтовой дуге, внимание исследователя Сумио Иидзимы (1991, Япония) привлекла необычная структура, состоящая из мельчайших волокон [1]. В процессе детального изучения методами электронной микроскопии было установлено, что диаметр этих волокон варьируется от 0,4 до нескольких десятков нанометров, а протяженность достигает нескольких микрон [2]. Волокна, образованные одним или несколькими слоями графена, свернутыми в трубку, были названы углеродными нанотрубками. Уникальное сочетание таких свойств, как баллистическая проводимость с плотностью тока, достигающей 10^9 А/см², большая механическая прочность и высокая теплопроводность, дают предпосылки для широкого круга применений однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) в качестве элементной базы современной наноэлектроники. В связи с этим проводятся интенсивные исследования электронных [3–9], диэлектрических [10, 11] и магнитных [12, 13] характеристик нанотрубок. Однако неразрешенным остается вопрос о явном виде зависимости индуктивности, возникающей при прохождении сквозь нанотрубку гармонического сигнала, от геометрических характеристик исследуемого объекта и параметров падающего излучения. Результаты настоящего исследования могут быть использованы при проектировании наноантенных устройств для детектирования излучения, в том числе активно изучаемого в настоящее время терагерцового диапазона.

Широко известно, что геометрия ОУНТ обладает цилиндрической симметрией. Электронные свойства подобных структур в большей степени определяются не конкретным видом кристаллической решетки, а симметрией структуры как целого. В настоящей работе ОУНТ рассмотрена как цилиндрически симметричная потенциальная яма с конечной высотой стенок, в поле которой находятся взаимодействующие между собой электроны проводимости. С учетом изложенного рассмотрим взаимодействие внешнего электромагнитного поля с нанотрубкой в рамках модели отклика электронного газа, находящегося во внешнем цилиндрически симметричном потенциале.

Электромагнитная волна, нормально падающая на ОУНТ, вызывает движение электронов этой трубки, описываемое, в рамках выбранной модели, вторым законом Ньютона

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = e\vec{E}, \quad (1)$$

где m , e , V — масса, заряд и скорость электрона; E — напряженность электрического поля волны. Используя соотношение $\vec{j} = en\vec{V}$, связывающее плотность тока со скоростью и концентрацией n (часто называемой плотностью) носителей заряда, перепишем закон Ньютона:

$$\left(\frac{m}{e^2 n} \right) \frac{dj}{dt} = E. \quad (2)$$

Часть выражения (2), заключенная в скобки, имеет размерность удельной индуктивности. Таким образом, при описании взаимодействия электромагнитной волны с электронным газом нанотрубки последняя может быть рассмотрена в рамках модели пассивного двухполюсника (рис. 1), обладающего удельными активным (R) и реактивным (X) сопротивлениями, а полный импеданс записывается в виде $Z = R + iX$, где i — мнимая единица. Реактивное сопротивление связано с индуктивностью соотношением

$$X = \omega L. \quad (3)$$

Здесь ω — частота падающей волны; L — удельная индуктивность рассматриваемой структуры. Следовательно, импеданс равен $Z = R + i\omega L$.

Необходимо отметить, что индуктивность электронного газа нанотрубки металлического типа обусловлена не магнитным потоком, пронизывающим поверхность трубки, а инертными свойствами электронов. Ввиду того, что электроны обладают конечной массой покоя и конечным значением подвижности, отклик электронного газа не носит мгновенного характера: при прохождении гармонического сигнала электронный газ нанотрубки откликается на внешнее возмущение с задержкой. Это явление было названо кинетической индуктивностью [14–16]. Далее удельную кинетическую индуктивность электронного газа нанотрубки обозначим как L_k . Примечательно, что в классических металлических проводниках макроскопических размеров тоже имеет место эффект кинетической индуктивности, но вследствие его малости по сравнению с индуктив-



Рис. 1. Схема, иллюстрирующая эквивалентность углеродной нанотрубки активному двухполюснику

ностью, обусловленной изменением магнитного потока, проходящего через образец, его вклад, как правило, не учитывается.

Исходя из (2), удельная кинетическая индуктивность

$$L_k = \frac{m}{e^2 n}. \tag{4}$$

Радиальную зависимость плотности электронного газа в присутствии внешнего электромагнитного возмущения целесообразно определить методами теории функционалов плотности, предполагающими минимизацию функционала полной энергии системы и последующее решение вариационного уравнения:

$$\begin{aligned} & \frac{2}{3} \pi r^3 n^3(r, \omega) + \frac{1}{2} (3\pi^2)^{\frac{2}{3}} n(r, \omega) - \frac{1}{36} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial n(r, \omega)}{\partial r} \right) + \\ & + \frac{1}{72} \frac{\partial n(r, \omega)}{\partial r} + E_m r \left\{ \cos\left(\frac{\omega}{c}(ct - r)\right) - \cos(\omega t) \right\} n(r, \omega) = 0, \end{aligned} \tag{5}$$

где r — расстояние от оси нанотрубки; c — скорость света.

Согласно результатам работы [11], электронная плотность ОУНТ металлического типа может быть получена как решение уравнения (5), зависящее от характеристик падающей электромагнитной волны следующим образом:

$$n(r, \omega) = U\left(\frac{A-1}{A}, 1, \frac{rA}{2}\right). \tag{6}$$

Здесь U — специальная функция Куммера [11];

$$A = 24 \sqrt{5,78 - E_{mr} \left\{ \cos \left(\frac{\omega}{c} (ct - r) \right) + \cos(\omega t) \right\}},$$

где E_m — амплитуда напряженности электрического поля электромагнитной волны.

Как было отмечено в работе [11], при превышении некоторого порогового значения интенсивности электромагнитного излучения решение уравнения (5) становится комплексным. Мнимая часть решения ответственна за наличие у электронного газа углеродной нанотрубки индуктивных свойств.

Исходя из (4) и (6), зависимость кинетической индуктивности ОУНТ металлического типа от диаметра объекта и частоты электромагнитной волны имеет явный вид

$$L_k = \frac{m}{e^2 U \left(\frac{A-1}{A}, 1, \frac{rA}{2} \right)}. \quad (7)$$

Формула (7) позволяет определить кинетическую индуктивность для конкретной конфигурации углеродной нанотрубки при заданной частоте и интенсивности излучения. Проведенный анализ показывает, что величина L_k практически не зависит от частоты ω . С усилением интенсивности падающего излучения I происходит уменьшение удельной кинетической индуктивности ОУНТ. Для монохроматической линейно-поляризованной волны с амплитудой напряженности электрического поля E_m интенсивность

$$I = \frac{\varepsilon_0 c E_m^2}{8\pi}.$$

Результаты расчета значений этой величины по формуле (7) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения удельной кинетической индуктивности L_k , Гн/м, в зависимости от интенсивности волны для нанотрубки при различных значениях диаметра и частоте излучения $\nu = 550$ ТГц

I , ГВт/м ²				
0,5	5,0	10	50	100
<i>Диаметр 2 нм</i>				
$20 \cdot 10^{-9}$	$11 \cdot 10^{-9}$	$10,5 \cdot 10^{-9}$	$10,2 \cdot 10^{-9}$	$10 \cdot 10^{-9}$
<i>Диаметр 20 нм</i>				
$1,77 \cdot 10^{-6}$	$1,06 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$	$1,01 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$
<i>Диаметр 40 нм</i>				
$6,82 \cdot 10^{-6}$	$4,23 \cdot 10^{-6}$	$4,15 \cdot 10^{-6}$	$4,04 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$

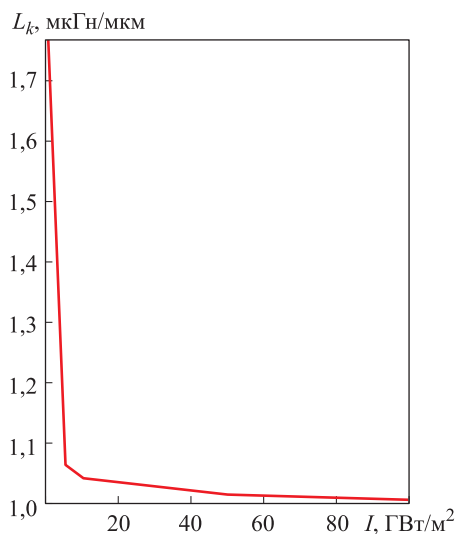


Рис. 2. Зависимость кинетической индуктивности от интенсивности падающей электромагнитной волны для нанотрубки диаметром 20 нм

С увеличением диаметра нанотрубки (см. табл. 1) возрастает удельная кинетическая индуктивность. Это связано с уменьшением электронной плотности, что находится в соответствии с результатами, полученными в работах [11, 13, 17]. Зависимость кинетической индуктивности от интенсивности падающей электромагнитной волны для нанотрубки диаметром 20 нм приведена на рис. 2. Важным остается анализ зависимости реактивного сопротивления электронного газа ОУНТ металлического типа от частоты и интенсивности падающего излучения, так как импеданс дает непосредственную количественную оценку индуктивных свойств, проявляемых углеродной нанотрубкой при взаимодействии с электромагнитной волной. Результаты

исследования искомых зависимостей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость реактивного сопротивления X , Ом, от интенсивности волны для нанотрубки диаметром 2 нм в терагерцовом диапазоне $\nu = 1$ ТГц (числитель) и $\nu = 550$ ТГц (знаменатель)

$I, \text{ ГВт/м}^2$				
0,5	5	10	50	100
963,65 / 320·10 ³	509,36 / 171·10 ³	497 / 165·10 ³	480 / 160·10 ³	475,93 / 158·10 ³

С увеличением интенсивности падающего излучения происходит уменьшение удельной кинетической индуктивности L_k и реактивного сопротивления X . Результаты численного расчета показывают, что с возрастанием частоты излучения увеличивается сопротивление X , при этом зависимость $X(\omega)$ не линейна, как могло показаться из формулы (3), а имеет более сложный характер.

Заключение. Проведено теоретическое исследование взаимодействия электромагнитных волн терагерцового и оптического диапазонов с ОУНТ металлического типа в рамках приближения отклика двумерного электронного газа, находящегося в цилиндрически симметричной потенциальной яме. Установлено, что электронный газ проявляет индуктивные свойства, которые зависят от диаметра нанотрубки, частоты и интенсивности излучения. Получены выражения для расчета значения кинетической индуктивности L_k и реактивного сопротивления X .

ЛИТЕРАТУРА

1. *Iijima S.* Helical microtubules of graphitic carbon // *Nature*. 1991. Vol. 354. P. 56–58. DOI: 10.1038/354056a0
2. *Qin L.C., Zhao X., Hirahara K., Miyamoto Y., Ando Y., Iijima S.* Materials science: The smallest carbon nanotube // *Nature*. 2000. Vol. 408. P. 50. DOI: 10.1038/35040699
3. *Ведерников А.И., Чаплик А.В.* Колебательные моды и электронно-фононное взаимодействие в полупроводниковых нанотрубках // *Физика и техника полупроводников*. 2004. Т. 38. № 11. С. 1358–1363.
4. *Сеид-Рзаева С.М.* Релаксация энергии неравновесных электронов в нанотрубке, сформированной свернутой квантовой ямой // *Физика и техника полупроводников*. 2013. Т. 47. № 6. С. 793–796.
5. *Ведерников А.А.* Моделирование пространственного распределения электронного газа в нанотрубке методом функционалов плотности // *Молодежный научно-технический вестник*. 2013. № 4. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/566136.html>
6. *Елецкий А.В.* Транспортные свойства углеродных нанотрубок // *Успехи физических наук*. 2009. Т. 179. № 3. С. 225–242. DOI: 10.3367/UFNr.0172.200204b.0401
7. *Захарченко А.А., Петров Б.К.* Проводимость однослойных углеродных нанотрубок с металлическими свойствами в приближении свободных электронов // *Вестник ВГТУ*. 2009. Т. 5. № 12. С. 105–109.
8. *Иванченко Г.С., Лебедев Н.Г.* Проводимость углеродных нанотрубок, обусловленная миграцией протонов по их поверхности // *Физика твердого тела*. 2009. Т. 51. № 11. С. 2281–2286.
9. *Захарченко А.А., Петров Б.К.* Энергетический спектр однослойных углеродных нанотрубок структурного типа «ARMCHAIR» в приближении свободных электронов // *Вестник ВГТУ*. 2013. Т. 9. № 3-1. С. 98–102.
10. *Садыхов Н.Р., Скоркин Н.А.* Воздействие нестационарного электрического поля с различным профилем переднего фронта на углеродные нанотрубки // *Физика и техника полупроводников*. 2012. Т. 46. № 8. С. 1043–1048.
11. *Еркович О.С., Ивлиев П.А.* Расчет электронной плотности углеродных нанотрубок во внешнем электромагнитном поле // *Наноматериалы и наноструктуры — XXI век*. 2016. Т. 7. № 1. С. 8–13.
12. *Островский П.М.* Проводимость углеродных нанотрубок в продольном магнитном поле // *Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2000. Т. 72. № 8. С. 600–604.
13. *Еркович О.С., Ивлиев П.А.* Расчет магнитных свойств однослойных углеродных нанотрубок в рамках метода функционалов плотности // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. 2016. № 4. С. 56–64. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-4-56-64
14. *Менде Ф.Ф.* Роль и место кинетической индуктивности зарядов в классической электродинамике // *Инженерная физика*. 2012. № 11. С. 10–19.
15. *High frequency conductivity of the high-mobility two-dimensional electron gas / P.J. Burke, I.B. Spielman, J.P. Eisenstein, L.N. Pfeiffer, K.W. West* // *Applied Physics Letters*. 2000. Vol. 76. Iss. 6. P. 745–747. DOI: 10.1063/1.125881

16. Семенов А.В., Девятков А.И., Куприянов М.Ю. Теоретический анализ работы сверхпроводящего детектора микроволнового излучения на кинетической индуктивности // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 2008. Т. 88. № 7-8. С. 514–520.

17. Ивлиев П.А. Радиальное распределение электронной плотности углеродной нанотрубки. Молодежный научно-технический вестник. 2014. № 9.
URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/732012.html>

Еркович Ольга Станиславовна — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Ивлиев Павел Александрович — аспирант, ассистент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Еркович О.С., Ивлиев П.А. Кинетическая индуктивность однослойных углеродных нанотрубок металлического типа // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. № 6. С. 56–64. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-6-56-64

KINETIC INDUCTANCE OF A SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBE OF METALLIC TYPE

O.S. Erkovich

erkovic@bmstu.ru

P.A. Ivliev

ivliev-pavel@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The study presents the results of theoretical studies of kinetic inductance L_k of a single-walled carbon nanotube of metallic type, taking into account the electron-electron interaction in the approximation of a right circular cylinder. The system under consideration is a cylindrically symmetric potential well with a finite height of the wall. As a part of the theory of two-dimensional electron gas response to the external electromagnetic disturbance we obtained kinetic inductance depending on the nanotube diameter, frequency and intensity of the radiation. Findings of the research show that L_k value increases with the increasing frequency, and decreases with the increasing radiation intensity

Keywords

Carbon nanotubes, kinetic inductance, electron density

Received 15.11.2016

© BMSTU, 2017

REFERENCES

- [1] Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 1991, vol. 354, pp. 56–58. DOI: 10.1038/354056a0
- [2] Qin L.C., Zhao X., Hirahara K., Miyamoto Y., Ando Y., Iijima S. Materials science: The smallest carbon nanotube. *Nature*, 2000, vol. 408, p. 50. DOI: 10.1038/35040699

- [3] Vedernikov A.I., Chaplik A.V. Vibration modes and electron-phonon interaction in semiconductor nanotubes. *Semiconductors*, 2004, vol. 38, iss. 11, pp. 1316–1322. DOI: 10.1134/1.1823067
- [4] Seid-Rzaeva S.M. Energy relaxation of non-equilibrium electrons in nanotube formed by convoluted quantum well. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2013, vol. 47, iss. 6, pp. 793–796 (in Russ.).
- [5] Vedernikov A.A. Simulation of electron gas spatial distribution in nanotube using density functional method. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskij vestnik*, 2013, no. 4 (in Russ.). Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/566136.html>
- [6] Eletskiy A.V. Carbon nanotubes and their emission properties. *Physics–Uspekhi*, 2002, vol. 45, no. 4, pp. 369–402. DOI: 10.1070/PU2002v045n04ABEH001033
- [7] Zakharchenko A.A., Petrov B.K. Conductivity of single-walled carbon nanotubes with metallic properties in the free-electron approximation. *Vestnik VGTU*, 2009, vol. 5, no. 12, pp. 105–109 (in Russ.).
- [8] Ivanchenko G.S., Lebedev N.G. Electrical conduction of carbon nanotubes due to the migration of protons over their surface. *Physics of the Solid State*, 2009, vol. 51, no. 11, p. 2421. DOI: 10.1134/S1063783409110365
- [9] Zakharchenko A.A., Petrov B.K. Energy spectrum of single-walled carbon nanotubes of the structural "Armchair" type in the free-electron approximation. *Vestnik VGTU*, 2013, vol. 9, no. 3-1, pp. 98–102 (in Russ.).
- [10] Sadykov N.R., Skorkin N.A. Effect of a nonstationary electric field with different front profiles on carbon nanotubes. *Semiconductors*, 2012, vol. 46, iss. 8, pp. 1020–1026. DOI: 10.1134/S1063782612080179
- [11] Erkovich O.S., Ivliev P.A. Calculation of electronic density of carbon nanotubes in an external electromagnetic field. *Nanomaterialy i nanostruktury — XXI vek* [Nanomaterials and Nanostructures — XXI Century], 2016, vol. 7, no. 1, pp. 8–13 (in Russ.).
- [12] Ostrovskiy P.M. Conductivity of carbon nanotubes in a longitudinal magnetic field. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 2000, vol. 72, iss. 8, pp. 419–421. DOI: 10.1134/1.1335120
- [13] Erkovich O.S., Ivliev P.A. Calculation of the magnetic properties of single-walled carbon nanotubes in the framework of density functional theory. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2016, no. 4, pp. 56–64 (in Russ.). DOI: 10.18698/1812-3368-2016-4-56-64
- [14] Mende F.F. Role and place of kinetic inductance of charges in classical electrodynamics. *Inzhenernaya fizika* [Engineering Physics], 2012, no. 11, pp. 10–19 (in Russ.).
- [15] Burke P.J., Spielman I.B., Eisenstein J.P., Pfeiffer L.N., West K.W. High frequency conductivity of the high-mobility two-dimensional electron gas. *Applied Physics Letters*, 2000, vol. 76, iss. 6, pp. 745–747. DOI: 10.1063/1.125881
- [16] Semenov A.V., Devyatov A.I., Kupriyanov M.Yu. Theoretical analysis of the operation of the kinetic inductance-based superconducting microwave detector. *JETP Letters*, 2008, vol. 88, iss. 7, pp. 441–447. DOI: 10.1134/S0021364008190077
- [17] Ivliev P.A. Radial electron density distribution of carbon nanotube. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskij vestnik*, 2014, no. 9 (in Russ.). Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/732012.html>

Erkovich O.S. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Ivliev P.A. — post-graduate student, Assistant of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Erkovich O.S., Ivliev P.A. Kinetic Inductance of a Single-Walled Carbon Nanotube of Metallic Type. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2017, no. 6, pp. 56–64 (in Russ.).

DOI: 10.18698/1812-3368-2017-6-56-64



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие авторов
И.В. Блудовой, Э.Н. Беяновой

**«Начала топологии в примерах
и задачах»**

Рассмотрены различные классические примеры топологических и метрических пространств и непрерывных отображений, сформулированы все необходимые топологические определения и утверждения. Читателям предложено самостоятельно доказать некоторые свойства указанных выше топологических и метрических пространств, а в случае недостаточной успешности попыток получить эти доказательства — узнать подробные решения предложенных задач.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru