

УДК 681.586.78

Р.А. Браже, А.Ф. Савин

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЗОНАНСНЫХ НАНОДАТЧИКОВ ДЛЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА СПИРАЛЬНЫХ НАНОТРУБКАХ

Браже Рудольф Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика» Ульяновского государственного технического университета, окончил физический факультет Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. Имеет множество научных работ, в том числе монографии, учебные пособия и авторские свидетельства на изобретения. Область научных интересов: волновые процессы, мета- и наноматериалы, наноэлектроника, элементы систем управления. [e-mail: brazhe@ulstu.ru].

Савин Андрей Федорович, окончил физико-математический факультет Ульяновского государственного педагогического университета им. И.Н. Ульянова. Ведущий аналитик ООО «РИТГ». Имеет публикации в области математического моделирования наномасштабных радиоэлектронных компонентов. [e-mail: a_f_savin@mail.ru].

Аннотация

Чувствительные элементы нанодатчиков для робототехнических и биоробототехнических систем на основе одиночных спиральных нанотрубок в последние годы привлекают внимание исследователей как с точки зрения возможностей их создания с использованием современных нанотехнологий, так и с точки зрения их высокой чувствительности к внешним воздействиям. Вследствие деформации нанокатушки в результате внешнего воздействия изменяется ее импеданс и происходит сдвиг резонансной частоты. В работе рассчитаны значения параметров, определяющих удельную электропроводность нанотрубки, приведены амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики рассматриваемых наноспиралей. Показано, что резонансная частота таких наносолоноидов может достигать десятков петагерц, а ее сдвиг в результате изменения длины наноспиралей на 1% может составлять десятые доли петагерц.

Ключевые слова: спиральные нанотрубки, резонансные нанодатчики, импедансные свойства.

ELECTRIC CHARACTERISTICS OF SENSING ELEMENTS OF RESONANCE NANOSENSORS FOR ROBOTIC SYSTEMS BASED ON SPIRAL NANOTUBES

Rudolf Aleksandrovich Brazhe, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Physics at Ulyanovsk State Technical University; graduated from the Faculty of Physics of Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky; an author of numerous scientific papers, monographs, tutorials, and invention certificates; has research interests in the field of wave processes, meta- and nanomaterials, nanoelectronics, and control system elements. e-mail: brazhe@ulstu.ru.

Andrei Fedorovich Savin, graduated from the Faculty of Physics and Mathematics of Ulyanovsk State Teachers University named after I.N. Ulyanov; Lead Analyzer of RITG, LLC; an author of publications in the field of mathematical modeling of nanoscale radioengineering components. e-mail: a_f_savin@mail.ru.

Abstract

Sensing devices of nanosensors for robotic and biorobotic systems based on separate spiral nanotubes draw an attention of researchers both as from the point of view of opportunities of their design with the use of the temporary nanotechnologies as from the point of view of their high sensitivity to external influences. Owing to deformation of nanocoil as a result of external influence, its impedance changes, and a shift of a resonant frequency appears. It is shown that the resonant frequency of such nanosolenoids can reach tens petahertz, and its shift can make the tenth shares of petahertz as a result of nanocoil's length change for 1 percent.

Key words: spiral nanotubes, resonant nanosensors, impedance properties.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время имеются работы, в которых описаны эксперименты по созданию датчиков давления, температуры, влажности, а также газовых датчиков на основе полимерных композитных пленок, содержащих углеродные нанотрубки [1–5]. Известны также попытки создания химических датчиков на основе углеродных нанотрубок, покрытых наночастицами кобальта [6]. Наибольший интерес с точки зрения минимально достижимых габаритов и высокой чувствительности представляют собой датчики, чувствительные элементы которых выполнены в виде одиночных спирально закрученных углеродных нанотрубок [7]. Их резонансная частота сдвигается при малейших воздействиях на спираль, например, при оседании на нее какой-либо наночастицы или молекулы, что позволяет заметить изменение массы до 10–19 г. На основе таких спиральных нанотрубок в полисиликоновой матрице могут быть созданы также тактильные датчики, импеданс которых заметно изменяется при прикосновении.

Для расчета амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик чувствительных элементов резонансных датчиков на спиральных нанотрубках важно знать их импедансные свойства, определяемые активным сопротивлением спирали, ее индуктивностью и собственной емкостью. Эта задача и ставится в настоящей работе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ. ПРИНЯТИЕ ДОПУЩЕНИЯ

Отличительной особенностью исследуемых нами углеродных нанотрубок является то, что рассматриваются не только классические углеродные нанотрубки типа C_6 , представляющие собой свернутый в трубку лист графена, но и нанотрубки в виде свернутых листов октаэдра графена (октаэдра графена) C_{44} (рис. 1). Их физические свойства описаны в работах [8–10]. Чувствительные элементы для емкостных и магнитоиндуктивных датчиков, выполненные из прямых и спиральных нанотрубок указанного вида, рассматривались нами в работах [11, 12].

Строго говоря, для сверхвысокочастотных электромагнитных волн спиральная нанотрубка является волноводом, в котором могут распространяться лишь определенные моды колебаний электрического и магнитного полей. Однако исключительно малые размеры ($l \leq 1 \text{ мкм}$) таких спиралей по сравнению с длиной электромагнитной волны вплоть до терагерцевых частот позволяют воспользоваться моделью последователь-

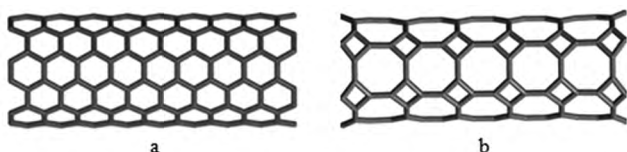


Рис. 1. Исследуемые нанотрубки: а – графен C_6 ; б – октаэдра графен C_{44}

ного RLC -контура с сосредоточенными параметрами. В рамках этого допущения вычисляются активное сопротивление, индуктивность и собственная емкость спиральных нанотрубок, а также их частотные характеристики.

Другим принятым допущением является то, что сворачиваемая в спираль нанотрубка не изменяет своего активного сопротивления, хотя для этого приходится вводить в нее периодически расположенные дефектные ячейки с большим и меньшим количеством сторон, чем в собственных ячейках нанотрубки. Обоснованность этого допущения обусловлена тем обстоятельством, что подобные дефекты структуры нельзя отнести к обычным точечным дефектам типа включений, вакансий или замещений. Они не вносят дополнительных зарядов, так как каждый атом углерода оказывается по-прежнему связанным с соседними атомами таким же количеством ковалентных связей, что и раньше. Не изменяется и тип самих атомов. Единственное, что изменяется, – появляются участки с положительной и отрицательной кривизной и, как результат, спирализация нанотрубки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для расчета полного сопротивления спиральных нанотрубок (рис. 2 [11]) может быть использована известная из курса общей физики формула:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad (1)$$

где R – активное сопротивление нанотрубки, L – индуктивность, C – собственная емкость, а ω – циклическая частота колебаний.

Максимально возможное значение индуктивности спирали вычислялось по формуле из работы [12]:

$$L = \frac{\pi}{4} \mu_0 \mu \left(\frac{d}{p_{\min}}\right)^2 l, \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, μ – относительная магнитная проницаемость сердечника (при

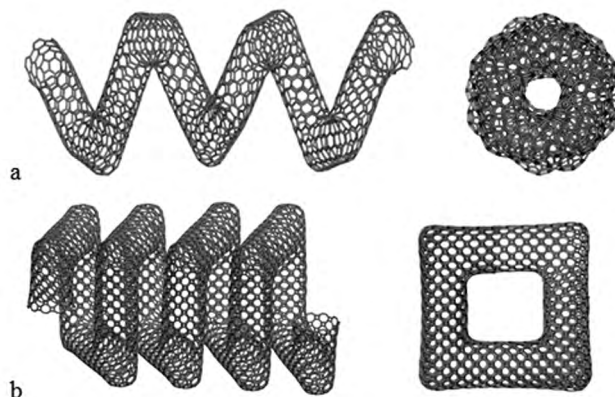


Рис. 2. Спиральные нанотрубки: а – графен C_6 ; б – октаэдра графен C_{44}

его наличии), d – диаметр нанотрубки в долях, кратных диаметру спирали $D_c (d = D_c/k, k = 1, 2, 3, \dots)$, p_{min} – минимальный шаг спирали, соответствующий $k = 1$, l – длина спирали.

Собственная емкость спиральной нанотрубки, в предположении $l \gg D_c$, находилась по приближенной формуле [13]:

$$C \approx \frac{4\epsilon_0}{\pi} l, \quad (3)$$

где C – собственная емкость спирали в пикофарадах, l – длина в сантиметрах.

Активное сопротивление спиральной нанотрубки легко вычислить по формуле [12]:

$$R = 4 \frac{l}{\sigma p_{min} d}, \quad (4)$$

где σ – поверхностная удельная проводимость нанотрубки.

В случае диффузионного переноса носителей в условиях их рассеяния удельная проводимость равна [14]

$$\sigma = e^2 D(E_F) D, \quad (5)$$

где $D(E_F)$ – плотность состояний носителей при значении их энергии, равной энергии Ферми E_F , а D – коэффициент диффузии, определяемый выражением $D = (1/2) v_F^2 \tau$, где v_F – скорость Ферми, τ – время рассеяния. Плотность состояний $D(E_F) = \sqrt{g_s g_v n} / \sqrt{\pi \hbar v_F}$ [14], где g_s и g_v – соответственно кратности спинового и долинного вырождений, n – двумерная концентрация носителей, которая может быть представлена в виде:

$$\sigma = \frac{1}{2} g_s g_v \frac{e^2}{h} v_F k_F \tau, \quad (6)$$

а \hbar – приведенная постоянная Планка.

При температуре T порядка комнатной температуры, когда $T \geq T_G$, где $T_G = 2\hbar k_F v_{ph} / k_B$ (здесь k_B – постоянная Больцмана) – температура Блоха-Грюнайзена, как показано в [14],

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\hbar^3} \frac{E_F}{4v_F^2} \frac{D_{dp}^2}{\rho_m v_{ph}^2} k_B T. \quad (7)$$

Здесь ρ_m – массовая плотность нанотрубки, v_{ph} – скорость распространения продольных упругих волн в материале (скорость продольных акустических фононов), D_{dp} – энергия связи деформация – потенциал. Из (6) и (7) следует температурная зависимость удельной проводимости нанотрубки в рассматриваемом режиме:

$$\sigma T = 2 g_s g_v \frac{e^2 \rho_m k_F v_{ph}^2 \hbar^3}{h k_B E_F D_{dp}^2}. \quad (8)$$

Здесь \hbar – постоянная Планка.

В таблице 1 представлены результаты расчета параметров, входящих в (8), для исследуемых нанотрубок. Значения v_{ph} для соответствующих структур взяты из

работы [15]. Генерация носителей заряда реализуется не термически, а путем амбиполярного допирования затворным напряжением [16], так что создаваемая им концентрация носителей не зависит от типа нанотрубки и ограничена лишь технологическими возможностями и пробойным значением напряженности электрического поля в материале подложки. Значения v_F и E_F определяются строением и наклоном энергетических зон для соответствующих нанотрубок. Структура энергетических зон рассчитывается отдельно на основе метода DFTB (комбинации теории функционала плотности DFT и метода сильной связи TB) с использованием программного пакета Accelrys Materials Studio 6.0. В таблице 1, в круглых скобках, указаны индексы хиральности рассматриваемых далее нанотрубок. Их выбор определяется из следующих соображений: обеспечить за счет небольшого диаметра нанотрубки более плотную намотку спирали с целью достижения максимальной ее индуктивности и получить нанотрубку металлического типа. Дело в том, что все $C_6(n,n)$ -нанотрубки «кресельного» типа являются металлическими, а две трети $C_6(n,0)$ -нанотрубок типа «зигзаг» – полупроводниковыми. В случае же октаграфеновых нанотрубок, наоборот, $C_{44}(n,0)$ -трубки металлические, а все $C_{44}(n,n)$ -трубки полупроводниковые.

Используя выражения (1)–(4) и данные таблицы 1, можно вычислить RLC -параметры исследуемых спиральных нанотрубок, а также частотные зависимости их индуктивного сопротивления $X_L(\omega) = \omega L$, емкостного сопротивления $X_C(\omega) = 1/(\omega C)$ и полного сопротивления $Z(\omega)$. Можно также найти для каждой такой нанотрубки собственную частоту колебаний $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, коэффициент затухания $\beta = R/(2L)$ и добротность $Q = \omega_0 / \Delta\omega_{рез}$, где $\Delta\omega_{рез}$ – ширина резонансной кривой по уровню действующего значения тока.

Таблица 1

Значения параметров, определяющих удельную электропроводность нанотрубки

Тип нанотрубки	$C_6(6,6)$	$C_{44}(6,0)$
g_s	2	2
g_v	2	1
v_{ph} , м/с	$37,4 \cdot 10^3$	$14,3 \cdot 10^3$
v_F , м/с	$8,95 \cdot 10^5$	$2,10 \cdot 10^5$
ρ_m , кг/м ²	$3,80 \cdot 10^{-7}$	$3,34 \cdot 10^{-7}$
n , м ⁻²	$2,5 \cdot 10^{17}$	$2,5 \cdot 10^{17}$
k_F , м ⁻¹	$8,85 \cdot 10^8$	$12,60 \cdot 10^8$
D_{dp} , Дж	$2,56 \cdot 10^{-18}$	$1,76 \cdot 10^{-18}$
E_F , Дж	$8,32 \cdot 10^{-20}$	$2,78 \cdot 10^{-20}$
$\sigma T / (e^2 / h)$	$4,15 \cdot 10^5$	$9,11 \cdot 10^3$
$\sigma(T = 300K)$, См	$4,78 \cdot 10^{-2}$	$3,99 \cdot 10^{-4}$

Примечание: в таблице 1 приведено значение двумерной удельной проводимости. Для получения объемной электропроводности его нужно поделить на толщину стенки нанотрубки, в качестве которой обычно принимают расстояние между соседними слоями в графите (0,34 нм).

Для расчета R - и L -параметров спиральной нанотрубки, согласно (2), (4), необходимо знать величину p_{min} , которая находится по формуле [12]:

$$p_{min} = \frac{1}{2} \alpha m d \sin \frac{\alpha \pi}{2n}, \quad (9)$$

где $\alpha = \sqrt{3}$, $m = 6$, $n = 6$ для нанотрубки $C_6(6,6)$ и $\alpha = \sqrt{2}$, $m = 4$, $n = 6$ для нанотрубки $C_{44}(6,0)$. Диаметры этих нанотрубок d выражаются через межатомное расстояние a_{cc} следующим образом: для нанотрубки $C_6(6,6)$ -типа $d = (18/\pi)a_{cc}$, $a_{cc} = 1,42 \text{ \AA}$; для нанотрубки $C_{44}(6,0)$ -типа $d = (6(1 + \sqrt{2})/\pi)a_{cc}$, $a_{cc} = 1,43 \text{ \AA}$ [17].

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В таблице 2 представлены результаты расчета погонных значений (на единицу длины спирали в микрометрах) активного сопротивления R_{noz} , индуктивности L_{noz} и емкости C_{noz} рассматриваемых спиральных нанотрубок, а также произведения их собственной частоты колебаний ω_0 на длину спирали и коэффициента затухания β .

Из таблицы 2 видно, что при длине спиральной нанотрубки порядка 1 мкм ее активное сопротивление

достигает десятков килоом из-за очень малой площади поперечного сечения проводника, а ее индуктивность и емкость, наоборот, чрезвычайно малы: порядка десятых долей пикогенри и десятых долей аттофарады соответственно. Это обуславливает очень высокую собственную частоту колебаний, достигающую единиц петагерц, но одновременно и чрезвычайно большой коэффициент затухания ($\sim 10^{16}$ – 10^{18} с^{-1}). В силу этого обстоятельства существует некоторая критическая длина наноспираль, по достижении которой в ней начинается аperiодическое затухание:

$$l_{кр} = \frac{2}{R_{noz}} \sqrt{\frac{L_{noz}}{C_{noz}}}.$$

Значение этой критической длины для рассматриваемых спиральных нанотрубок также приведено в таблице 2. Отсюда ясно, что из-за огромного затухания чувствительные элементы для резонансных датчиков очувствления на основе спиральных нанотрубок $C_{44}(6,0)$ -типа практически невозможно реализовать, так как при длине спирали, едва превышающей один ее шаг, колебания в ней аperiодически затухают.

На рисунке 3 представлены амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики вынужденных колебаний тока в спиральной нанотрубке $C_6(6,6)$ -типа длиной $l = 0,1 \text{ мкм}$, определяемые соответственно выражениями:

$$\frac{I_m}{I_0} = \frac{2\beta}{\sqrt{(\omega_0^2 / \omega - \omega)^2 + 4\beta^2}},$$

Таблица 2

Геометрические и электрические параметры исследуемых спиральных нанотрубок

Тип НТ	d , нм	p_{min} , нм	R_{noz} , Ом/мкм	L_{noz} , нГн/мкм	C_{noz} , пФ/мкм	ω_0 , мкм/с	β , с^{-1}	$l_{кр}$, мкм
$C_6(6,6)$	0,81	1,84	$1,90 \cdot 10^4$	$1,91 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{-7}$	$6,80 \cdot 10^{15}$	$4,97 \cdot 10^{16}$	0,135
$C_{44}(6,0)$	0,66	0,69	$7,48 \cdot 10^6$	$9,02 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{-7}$	$3,13 \cdot 10^{15}$	$4,15 \cdot 10^{18}$	0,00125

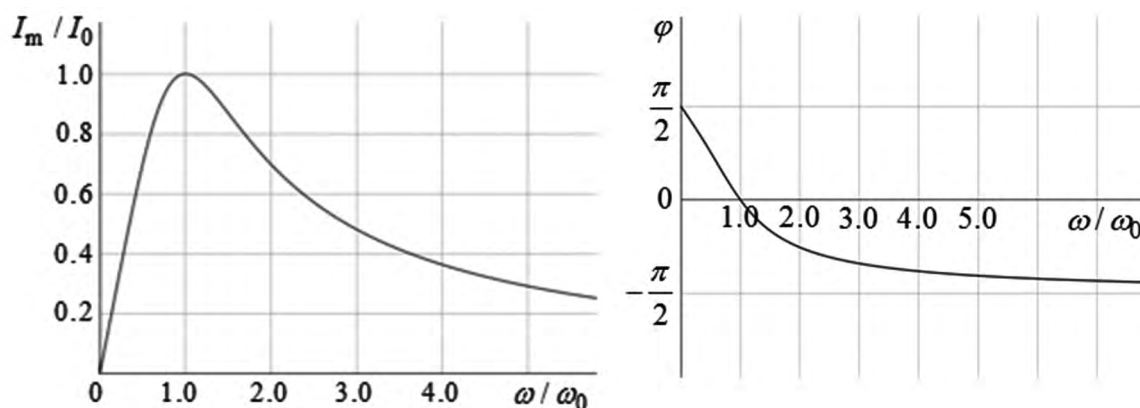


Рис. 3. Амплитудно-частотная (слева) и фазово-частотная (справа) характеристики спиральной нанотрубки $C_6(6,6)$ -типа: $l = 0,1 \text{ мкм}$, $\omega_0 = 6,80 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$, $\beta = 4,97 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arctg \left[2 \frac{(\beta / \omega_0)(\omega / \omega_0)}{1 - (\omega / \omega_0)^2} \right],$$

где I_m/I_0 – отношение амплитуды тока в спиральной нанотрубке к амплитуде тока в индуктивности на резонансной частоте ω_0 , а φ – сдвиг фаз между приложенным внешним гармонически изменяющимся напряжением и током.

Простой расчет показывает, что при таких высоких частотах собственных колебаний изменение длины наноспиралы в результате деформации на 1% вызывает сдвиг резонансной частоты на десятые доли фемтогерц. При этом электрическая добротность спиральной нанотрубки как электромеханического резонатора оказывается чрезвычайно низкой. Из рисунка 3 видно, что она не превышает 0,46.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из проведенного исследования следует, что спиральные нанотрубки вполне могут быть использованы в качестве чувствительных элементов резонансных нанодатчиков очувствления для робототехнических систем. Несмотря на большое активное сопротивление таких наноспиралей вследствие малой площади поперечного сечения проводника, по сути дела одноатомной толщины, и, как следствие, большое затухание электромагнитных колебаний, в таких резонаторах, их резонансные частоты могут достигать десятков фемтогерц, что обуславливает высокую чувствительность к малейшим деформациям спирали.

Для практического использования результатов работы следует отработать технологию синтеза спиральных нанотрубок высокого качества с достаточно большим процентом выхода и технологию создания омических контактов к их концам. Впрочем, как следует из работы [7], это вполне достижимая задача в условиях современного развития нанотехнологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li C., Thostenson E.T., Chou T. W. Sensors and actuators based on carbon nanotubes and their composites: A review // *Composites Science and Technology*. – 2008. – № 68. – pp. 1227–1249.
2. Hu N., Karube Y., Arai M. Investigation on sensitivity of a polymer/carbon nanotube composite strain sensor // *Carbon*. – 2010. – № 48. – pp. 680–687.
3. Darren J., Vosgueritchian M., Tee B. Skin-like pressure and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes // *Nature Nanotechnology*. – 2011. – № 6. – pp. 788–792.
4. Novel capacitance-type humidity sensor based on multi-wall carbon nanotube/SiO₂ composite films / X. Liu, Z. Zhao, T. Li, X. Wang // *Journal of Semiconductors*. – 2011. – V. 32, № 3. – pp. 034006-1–034006-5.
5. Абдрахимов Р.Р., Сапожников С.Б., Сеницын В.В.

Сенсоры давления и температуры на основе суспензии эпоксидной смолы и углеродных нанотрубок // *Вестник ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. – 2013. – Т. 13, № 4. – С. 16–23.

6. Enhancement of NH₃ gas sensitivity at room temperature by carbon nanotube-based sensor coated with Co nanoparticles / L.Q. Nguyen, P.Q. Phan, H.N. Duong, H.D. Nguyen, L.H. Nguyen // *Sensors*. – 2013. – V. 13. – pp. 1754–1762.

7. Coiled carbon nanotubes as self-sensing mechanical resonators / A. Volodin, D. Buntinx, M. Ahlskog, A. Fonseca, J.B. Nagy, C. Van Haesendonck // *Nano Lett.* – 2004. – V. 4, № 9. – pp. 1775–1779.

8. Enyashin A.N., Ivanovskii A.L. Graphene allotropes: stability, structural and electronic properties from DF-TB calculations // *Phys. Status Solidi (b)*. – 2011. – V. 8. – pp. 1879–1883.

9. Беленков Е.А., Грешняков В.А. Классификация структурных разновидностей углерода // *ФТТ*. – 2013. – Т. 55, вып. 8. – С. 1640–1650.

10. Подливаев А.И., Опенев Л.А. Кинетическая устойчивость октаграфена // *ФТТ*. – 2013. – Т. 55, вып. 12. – С. 2464–2467.

11. Браже Р.А., Савин А.Ф. Емкостные датчики на основе нанотрубных суперконденсаторов // *Известия вузов. Электроника*. – 2016. – Т. 21, № 1. – С. 55–56.

12. Браже Р.А., Савин А.Ф. Чувствительные элементы магнитоиндуктивных датчиков на нанотрубках различной конфигурации // *Изв. высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2015. – № 3 (35). – С. 125–133.

13. Knight D.W. The self-resonance and self-capacitance of solenoid coils: applicable theory, models and calculation methods. – URL: http://g3ynh.info/zdocs/magnetics/appendix/self_res/self-res.pdf (дата обращения: 25.06.2018).

14. Electronic transport in two-dimensional graphene / S. Das Sarma, S. Adam, E.H. Hwang, E. Rossi // *Rev. Mod. Phys.* – 2011. – V. 83, № 2. – pp. 407–471.

15. Браже Р.А., Кочаев А.И., Мефтахутдинов Р.М. Упругие волны в углеродных 2D-супракристаллах // *ФТТ*. – 2011. – Т. 53, вып. 8. – С. 1614–1618.

16. Браже Р.А., Литвиненко М.В. Гигантский эффект Фарадея в 2D-супракристаллах в сравнении с графеном // *ЖТФ*. – 2015. – Т. 85, вып. 2. – С. 118–121.

17. Браже Р.А., Каренин А.А. Супракристаллические нанотрубки // *Радиоэлектронная техника : межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В.А. Сергеева*. – Ульяновск : УЛГТУ, 2010. – С. 148–155.

REFERENCES

1. Li C., Thostenson E.T., Chou T. W. Sensors and Actuators Based on Carbon Nanotubes and Their Composites: A review. *Composites Science and Technology*, 2008, no. 68, pp. 1227–1249.
2. Hu N., Karube Y., Arai M. Investigation on Sensitivity of a Polymer/Carbon Nanotube Composite Strain Sensor. *Carbon*, 2010, no. 48, pp. 680–687.

3. Darren J., Vosgueritchian M., Tee B. Skin-like Pressure and Strain Sensors Based on Transparent Elastic Films of Carbon Nanotubes. *Nature Nanotechnology*, 2011, no. 6, pp. 788–792.
4. Liu X., Z. Zhao, T. Li, X. Wang Novel Capacitance-Type Humidity Sensor Based on Multi-Wall Carbon Nanotube/SiO₂ Composite Films. *Journal of Semiconductors*, 2011, vol. 32, no. 3, pp. 034006-1–034006-5.
5. Abdrakhimov R.R., Sapozhnikov S.B., Sinitsyn V.V. Sensory davleniia i temperatury na osnove suspenzii epoksidnoi smoly i uglirodnykh nanotrubok [Pressure and Temperature Sensors Basis of Ordered Structures of Carbon Nanotubes in an Epoxy Resin]. *Vestnik YuUrGU. Ser. Kompiuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University Series 'Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics'], 2013, vol. 13, no. 4, pp. 16–23.
6. Nguyen L.Q., P.Q. Phan, H.N. Duong, H.D. Nguyen, L.H. Nguyen Enhancement of NH₃ Gas Sensitivity at Room Temperature by Carbon Nanotube-Based Sensor Coated with Co Nanoparticles. *Sensors*, 2013, vol. 13, pp. 1754–1762.
7. Volodin A., D. Buntinx, M. Ahlskog, A. Fonseca, J.B. Nagy, C Van Haesendonck. Coiled Carbon Nanotubes as Self-Sensing Mechanical Resonators. *Nano Lett*, 2004, vol. 4, no. 9, pp. 1775–1779.
8. Eniashin A.N., Ivanovskii A.L. Graphene Allotropes: Stability, Structural and Electronic Properties from DF-TB Calculations. *Phys. Status Solidi (b)*, 2011, vol. 8, pp. 1879–1883.
9. Belenkov E.A., Greshniakov V.A. Klassifikatsiia strukturnykh raznovidnostei ugleroda [Classification of Carbon Structural Variety]. *FTT* [Physics of Solids], 2013, vol. 55, iss. 8, pp. 1640–1650.
10. Podlivaev A.I., Openov L.A. Kineticheskaia ustoichivost oktagrafena [Octagraphene Cynethic Stability]. *FTT* [Physics of Solids], 2013, vol. 55, iss. 12, pp. 2464–2467.
11. Brazhe R.A., Savin A.F. Emkostnye datchiki na osnove nanotrubnykh superkondensatorov [Nanotube Ultra Capacitor-Based Capacitance Sensors]. *Izvestiia vuzov. Elektronika* [University Proceedings. Electronics], 2016, vol. 21, no. 1, pp. 55–56.
12. Brazhe R.A., Savin A.F. Chuvstvitelnye elementy magnitoinduktivnykh datchikov na nanotrubkakh razlichnoi konfiguratsii [Sensing Elements of Magnetic Inductive Sensors on Nanotubes of Various Configuration]. *Izv. vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki* [University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences], 2015, no. 3 (35), pp. 125–133.
13. Knight D.W. *The Self-Resonance and Self-Capacitance of Solenoid Coils: Applicable Theory, Models and Calculation Methods*. Available at: http://g3ynh.info/zdocs/magnetics/appendix/self_res/self-res.pdf (accessed: 25.06.2018).
14. Sarma S. Das, S. Adam, E.H. Hwang, E. Rossi. Electronic Transport in Two-Dimensional Graphene. *Rev. Mod. Phys.*, 2011, vol. 83, no. 2, pp. 407–471.
15. Brazhe R.A., Kochaev A.I., Meftakhutdinov R.M. Uprugie volny v uglerodnykh 2D-suprakristallakh [Elastic Waves in Carbonaceous 2D-Supracrystal]. *FTT* [Physics of Solids], 2011, vol. 53, iss. 8, pp. 1614–1618.
16. Brazhe R.A., Litvinenko M.V. Gigantskii effekt Faradeia v 2D-suprakristallakh v sravnenii s grafenom [Strong Faraday Effect in 2-D Supracrystal in Comparison with a Graphene]. *ZhTF* [Journal of Applied Physics], 2015, vol. 85, iss. 2, pp. 118–121.
17. Brazhe R.A., Karenin A.A. Suprakristallicheskie nanotrubki [Supracrystal Nanotubes]. *Radioelektronnaia tekhnika. Mezhvuz. sb. nauchn. tr. pod red. V.A. Sergeeva* [Radioengineering. International Proc., edited by V.A. Sergeev]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2010, pp. 148–155.