

Резонансные наноконструкции на основе углеродных нанотрубок, упруго закрепленных на обоих концах

В.Л. Леонтьев, С.В. Булярский

Ульяновский государственный университет
432000 Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42
e-mail: leontievvl@ulsu.ru

Рассмотрена система двух углеродных нанотрубок, упруго закрепленных на своих концах. Проводится анализ частот свободных колебаний системы, учитывающий не только поступательные, но и вращательные движения нанотрубок. Предлагаются конструкции детекторов и антенн, состоящие из однослойных или из многослойных нанотрубок и обеспечивающие совпадение низших частот их свободных поступательных и вращательных колебаний. Выявлены условия, при которых возникающий в системе резонанс плазмонных колебаний накладывается на резонанс поступательных и вращательных механических колебаний нанотрубок, что приводит к повышению чувствительности резонансного детектора и к увеличению чувствительности либо мощности излучения антенны. Предложены способы технической реализации упругих закреплений концов углеродных нанотрубок и связанные с этим новые модели резонансных детекторов и антенн. Предполагается возможность этих реализаций.

Введение

Создание новых резонансных наноразмерных детекторов и их совершенствование на основе применения нанотрубок – одно из направлений развития наноразмерных электромеханических систем. В статье [1], по-видимому впервые, был предложен наноразмерный детектор, содержащий углеродную нанотрубку (УНТ). Подобные исследования на уровне электромеханических систем с небольшим конечным числом степеней свободы имеют большое значение для проектирования эффективных и рациональных наноразмерных конструкций, поскольку выявляют и учитывают их основные динамические характеристики. Результат работы [1] опирался на использование только особых механических свойств УНТ. Этот недостаток был выявлен и частично исправлен в работе [2]. Была рассмотрена модель резонансного наноразмерного детектора терагерцового детектора, в котором используются не только свойства механического резонанса в двух параллельных УНТ, но и плазмонные резонансы, которые, как отмечалось ранее в статьях [3,4,5], возникают в этих УНТ. Была предложена конструкция наноразмерного детектора,

чувствительность которого существенно превышает чувствительность ранее известных детекторов. Однако, в математической модели [2] механических колебаний отдельной УНТ, входящей в состав детектора, учитывается лишь одна степень свободы УНТ, отражающая только поступательное движение каждой из двух УНТ детектора. Такой подход не позволяет раскрыть всех свойств анализируемой системы.

В работах [6, 7, 8] рассмотрены модели наноразмерных антенн, содержащих УНТ, и установлено, что увеличение амплитуды механических колебаний УНТ антенн оказывает значительное положительное влияние на улучшение качественных и количественных характеристик нанорадио. Чувствительность принимающей антенны зависит от амплитуды резонансных колебаний УНТ системы, вызванных модулированным внешним излучением, и возрастает в случае совместного резонанса поступательных и вращательных механических колебаний обеих УНТ антенны. Мощность излучающей антенны также увеличивается в случае совместного резонанса поступательных и вращательных колебаний УНТ антенны.

Ранее моделирование колебаний УНТ проводилось на основе теории оболочек [9, 10], классической теории упругости [11], классической молекулярной механики [12], молекулярной механики, в которой используется новый потенциал сил межатомного взаимодействия [13], а также на основе теории стержней. Данные модели позволяют анализировать системы, которые характеризуются большим конечным либо даже бесконечным числом степеней свободы. Однако, исследования на уровне электромеханических систем с небольшим конечным числом степеней свободы также имеют большое значение для проектирования эффективных и рациональных наноразмерных конструкций, поскольку выявляют и учитывают прежде всего основные динамические характеристики конструкций.

В настоящей работе исследуется конструкция детектора или антенны, содержащая две УНТ, в исходном состоянии параллельных друг другу. В отличие от работы [2], в которой каждая УНТ на одном конце жестко закреплена, а на другом конце – свободна, во-первых, предлагается упругое закрепление УНТ на обоих концах, во-вторых, изучаются не только поступательные, но и вращательные движения нанотрубок. В этом случае возможно выполнение условий возникновения совместного резонанса не только плазмонных колебаний и вынужденных резонансных поступательных колебаний УНТ, но и вынужденных резонансных вращательных колебаний этих УНТ. На основе этой модели строится конструкция наноразмерного высокочувствительного детектора.

Модель передающей линии, образованной двумя параллельными УНТ

В рассматриваемой конструкции детектора содержатся УНТ, которые в одном варианте детектора являются полностью однослойными, а в других вариантах детекторов - однослойными в большей своей части. Поэтому, вслед за работой [2], а также на основании результатов теоретических исследований [14] и экспериментальных исследований [15, 16] для описания плазмонных колебаний в каналах, образованных однослойными УНТ, используется теория жидкости Томонаги-Латтинжера (ЖТЛ), в рамках которой плазмонные колебания описываются математической моделью согласованных перемещений массивов электронов. Система дифференциальных уравнений такой математической модели плазмонных колебаний в передающей линии, предложенной в [17] и использованной в [2], имеет вид:

$$-\frac{\partial v}{\partial z} = L_{eff} \frac{\partial i}{\partial t} + R_{eff} i, \quad -\frac{\partial i}{\partial z} = C_E \frac{\partial v}{\partial t}, \quad (1)$$

где $v = v(z, t)$, $i = i(z, t)$ – напряжение и сила тока в передающей линии,

$$L_{eff} = \frac{L_M + 2L_K}{1 + 2C_E / C_Q}, \quad R_{eff} = \frac{h}{4e^2 l_{m.f.p.} (1 + 2C_E / C_Q)};$$

электростатическая емкость

$$C_E = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon}{\ln(W / 2r_c)};$$

погонная магнитная индуктивность

$$L_M = \frac{\mu_0 \mu}{\pi} \ln(W / 2r_c);$$

погонная кинетическая индуктивность

$$L_K = \frac{h}{8e^2 v_F};$$

квантовая емкость

$$C_Q = \frac{8e^2}{h v_F};$$

ϵ_0 и μ_0 – соответственно диэлектрическая и магнитная постоянные; ϵ и μ – соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, в которой находятся УНТ; W – расстояние между двумя УНТ; $l_{m.f.p.}$ – длина свободного пробега; v_F – скорость Ферми; r_c – радиус УНТ.

В рамках предположений о гармонической зависимости от времени внешнего излучения и о малости деформаций УНТ с помощью этой модели на основе (1) в работе [2] получено выражение для амплитуды стоячей волны, возникающей в передающей линии, образованной двумя нанотрубками, в окрестности резонансной частоты Ω вынужденных плазмонных колебаний

$$V_0 - V_1 H(\omega),$$

где V_1 и ω – соответственно амплитуда и частота внешнего сигнала;

$$H(\omega) = Q / \sqrt{Q^2(1 - \omega^2 / \Omega^2)^2 + \omega^2 / \Omega^2}$$

- амплитудно-частотная характеристика (АЧХ); Q – добротность плазмонного осциллятора.

Модель свободных механических колебаний конструкции

Рассматривается детектор или антенна (рис. 1), состоящие из двух одинаковых однослойных УНТ, упруго закрепленных на своих концах и в недеформированном состоянии системы параллельных друг другу. Жесткости пружин попарно равны C_1 и C_2 , масса каждой УНТ равна M . К двум УНТ детектора приложено постоянное напряжение V_0 , а также гармонически изменяющееся напряжение с амплитудой V_1 и частотой ω , порождаемое внешним излучением.

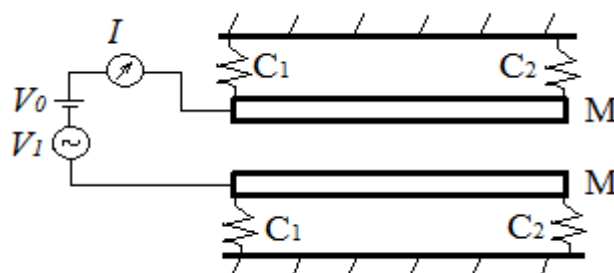


Рис. 1. Electromechanical diagram of the detector

Механическая часть системы состоит из двух абсолютно жестких стержней, каждый из которых имеет массу M , сосредоточенную в точке, лежащей на оси стержня и находящейся на расстоянии l_1 от пружины с жесткостью C_1 и на расстоянии $l_2 = l - l_1$ от пружины с жесткостью C_2 . Момент инерции стержня J равен $M\rho^2$, где ρ – радиус инерции.

Каждый из стержней может совершать как поступательное движение вместе с центром масс, так и вращательное движение относительно него. Кинетическая и потенциальная энергии абсолютно жесткого стержня

(рис. 2), имеющего две степени свободы и движущегося в плоскости, записываются соответственно в виде:

$$T = \frac{1}{2} M \left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} J \left(\frac{d\varphi(t)}{dt} \right)^2, \quad (2)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} C_1 (x + l_1 \varphi)^2 + \frac{1}{2} C_2 (x - l_2 \varphi)^2, \quad (3)$$

где $x(t)$ – перемещение точки стержня, в которой сосредоточена его масса, в направлении перпендикулярном исходному расположению оси стержня; $\varphi(t)$ – угол поворота стержня.

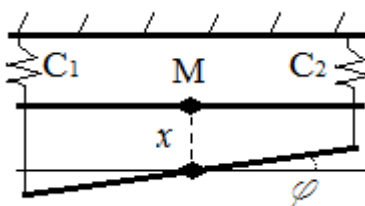


Рис.2. Two degrees of freedom of CNT

Система уравнений Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial \Pi}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} - \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} = 0,$$

характеризующих свободные колебания стержня, записывается с учетом (2), (3) в виде

$$\begin{aligned} & M \ddot{x} + C_1 (x + l_1 \varphi) + C_2 (x - l_2 \varphi) = \\ & = M \ddot{x} + (C_1 + C_2)x + (C_1 l_1 - C_2 l_2)\varphi = 0, \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & M \rho^2 \ddot{\varphi} + C_1 (x + l_1 \varphi) l_1 - C_2 (x - l_2 \varphi) l_2 = \\ & = M \rho^2 \ddot{\varphi} + (C_1 l_1 - C_2 l_2)x + (C_1 l_1^2 + C_2 l_2^2)\varphi = 0. \quad (5) \end{aligned}$$

Эти уравнения в общем случае являются связанными друг с другом, и одна УНТ детектора характеризуется двумя частотами свободных колебаний. Однако, в случае, когда

$$C_1 l_1 = C_2 l_2, \quad (6)$$

из первого уравнения системы уходит слагаемое, содержащее $\varphi(t)$, а из второго уравнения - слагаемое, элементом которого является $x(t)$. Уравнения становятся несвязанными. Однако, спектр частот свободных колебаний отдельной УНТ детектора при этом будет содержать в общем случае две различные частоты свободных колебаний

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{M}}, \quad \lambda_2 = \sqrt{\frac{C_1 l_1^2 + C_2 l_2^2}{M \rho^2}}. \quad (7)$$

Если параметры УНТ детектора выбрать таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$l_1 l_2 = \rho^2, \quad (8)$$

то частота λ_1 свободных поступательных колебаний $x(t)$ совпадет с частотой λ_2 свободных вращательных колебаний $\varphi(t)$, то есть

$$\lambda_2 = \sqrt{\frac{(C_1 + C_2) l_1 l_2}{M \rho^2}} = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{M}} = \lambda_1, \quad (9)$$

что приведет к одновременной реализации вынужденных резонансных поступательных и вращательных колебаний. Чувствительность такого детектора возрастет.

Возможны различные способы выполнения условия (9) при конструировании детектора или антенны. В одном из них в состав детектора включаются две параллельные в состоянии покоя однослойные УНТ, к каждой из которых присоединяются по два компактных материальных элемента, имеющих массы M_1 и расположенных симметрично на расстояниях a относительно середины однослойной УНТ, для которой $l_1 = l_2$ (рис. 3).

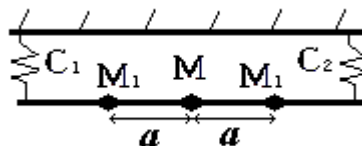


Рис. 3. The modified model of CNT

Суммарная масса УНТ и двух дополнительных компактных тел равна $(M + 2M_1)$, их момент инерции относительно оси, проходящей через середину УНТ, равен $(M l^2 / 12 + 2M_1 a^2)$. Уравнения Лагранжа, описывающие свободные колебания УНТ, совмещенной с двумя компактными телами, имеют вид

$$(M + 2M_1) \ddot{x} + (C_1 + C_2) \dot{x} + (C_1 l_1 - C_2 l_2) \dot{\varphi} = 0, \quad (10)$$

$$(M l^2 / 12 + 2M_1 a^2) \rho^2 \ddot{\varphi} + (C_1 l_1 - C_2 l_2) x + (C_1 l_1^2 + C_2 l_2^2) \varphi = 0 \quad (11)$$

и дают условия

$$C_1 l_1 = C_2 l_2, \quad \frac{C_1 + C_2}{M + 2M_1} = \frac{(C_1 + C_2) l_1 l_2}{M l^2 / 12 + 2M_1 a^2}, \quad (12)$$

при выполнении которых частоты свободных поступательных и вращательных колебаний будут совпадать. Второе условие (12), принимающее в случае $l_1 = l_2 = l/2$ вид

$$\frac{M_1}{M} = \frac{l^2 / 6}{2a^2 - l^2 / 2}, \quad (13)$$

накладывает на параметр a ограничение $a > l/2$. Пусть

$$a = l/2 + l/100 = 51 \cdot l/100,$$

то есть компактные тела присоединяются к УНТ на ее концах. В этом случае

$$\frac{M_1}{M} = \frac{2500}{303}.$$

Конструкция каждой из двух таких УНТ, входящих в состав детектора, характеризуется рисунком 4.

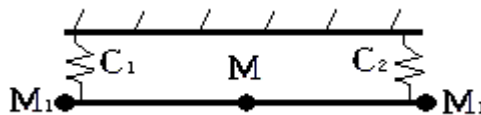


Рис. 4. The diagram of CNT with two bodies in the case $\lambda_1 = \lambda_2$

Модель вынужденных электромеханических колебаний конструкции

Погонная пондеромоторная сила, возникающая в каждой из двух УНТ детектора или антенны под влиянием внешнего излучения, характеризуется выражением [2]

$$f(z, t) = -\frac{dC_E}{dW} \frac{V^2(z)}{4} (1 + 2\alpha_m \cos \omega_m t + \frac{\alpha_m}{2}), \quad (14)$$

где ω – несущая частота внешнего сигнала

$$V(z, t) = V(z) \cos \omega t (1 + \alpha_m \cos \omega_m t);$$

ω_m, α_m – соответственно частота и глубина его модуляции.

Уравнения вынужденных колебаний УНТ конструкции, вызванных внешним излучением (14), с учетом диссипации записываются в виде

$$\ddot{x} + 2\gamma_x \dot{x} + \lambda_1^2 x = \frac{\alpha_m V_0^2 l}{4(M + 2M_1)} \frac{dC_E}{dW} \cos \omega_m t, \quad (15)$$

$$\ddot{\varphi} + 2\gamma_\varphi \dot{\varphi} + \lambda_2^2 \varphi = \frac{\mu[f(z,t)]}{(Ml^2/12 + 2M_1 a^2)\rho^2}, \quad (16)$$

где γ_x, γ_φ – коэффициенты затухания механических поступательных и вращательных колебаний; $\mu[f(z,t)]$ – момент ponderomotorных сил относительно оси, проходящей через точку расположения сосредоточенной массы M , который вычисляется с учетом зависимости W от координаты, отсчитываемой вдоль продольной оси УНТ.

В случае $\omega_m = \lambda_1 = \lambda_2$ возникнут резонансные механические поступательные и вращательные колебания обеих УНТ. Если при этом несущая частота ω внешнего сигнала совпадает с Ω , то эти механические колебания совмещаются с резонансными плазмонными колебаниями, и в результате чувствительность детектора, зависящая от амплитуды механических колебаний двух УНТ, возрастает. Это является следствием следующих обстоятельств. Чувствительность детектора определяется формулой [2]:

$$R = \frac{\Delta J}{P_\omega}, \quad (17)$$

в которой P_ω – мощность излучения, принимаемого детектором, а ΔJ – амплитуда тока в цепи детектора, зависящая от амплитуды Δx механических колебаний УНТ [2].

Амплитуда суммарных механических колебаний пропорциональна квадрату амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) $H(\omega)$ плазмонного резонатора, а также пропорциональна АЧХ $H_x(\omega_m)$ механических поступательных колебаний УНТ и АЧХ $H_\varphi(\omega_m)$ механических вращательных колебаний УНТ. Следовательно, амплитуда суммарных механических колебаний системы двух УНТ на их совместном электромеханическом резонансе пропорциональна Q^2 – квадрату добротности плазмонного резонатора, а также Q_x – добротности механического поступательного резонатора и Q_φ – добротности механического вращательного резонатора, то есть

$$\Delta x \propto H^2(\omega) H_x(\omega_m) H_\varphi(\omega_m) \propto Q^2 Q_x Q_\varphi. \quad (18)$$

Таким образом, увеличение амплитуды механических колебаний (18) при совпадении низших частот несвязанных поступательных и вращательных свободных колебаний ведет к значительному возрастанию чувствительности (17) детектора. Действительно, пусть расстояние между двумя параллельными в исходном положении УНТ равно 10 nm, длина каждой УНТ равна 500 nm, радиус УНТ равен 1 nm и амплитуда поступательного движения каждой УНТ составляет порядка 2 nm. Тогда вращательные колебания УНТ при малом угле их поворота порядка 0.5 градуса дадут дополнительные линейные перемещения концов каждой УНТ порядка 2.2 nm, что вместе с поступательным перемещением УНТ выводит систему почти на предельно допустимые суммарные перемещения двух УНТ, не приводящие к их контакту.

Технические реализации упругих закреплений концов УНТ

Предлагаемое здесь упругое закрепление (защемление) **первого типа** является развитием применяемого в существующих технических устройствах жесткого закрепления концов УНТ. Ни одна техническая реализация так называемого жесткого закрепления в действительности не дает идеальной жесткой фиксации концов УНТ как по их линейным перемещениям, так и по их поворотам относительно координатных осей. Твердая деформируемая связь, которая является внешней по отношению к УНТ и называется жестким закреплением, всегда обладает некоторой упругостью как за счет упругости стенки, в которой закрепляется конец УНТ, так и за счет деформационной упругости закрепленного конца самой УНТ. Таким образом, любое жесткое закрепление в некоторой степени обладает свойствами упругого закрепления и, следовательно, практические реализации упругого закрепления существуют. Увеличение степени упругости связи приближает реальное жесткое закрепление по его свойствам к идеальному упругому закреплению, при этом обеспечивается прочность связи за счет сохранения некоторых свойств “жесткого закрепления”. Так, в одном из вариантов для ослабления свойства жесткости внешней связи и для усиления свойства ее упругости предлагается в цилиндрической полости стенки установить параллельно основной УНТ-О, заходящей своим концом в эту полость,

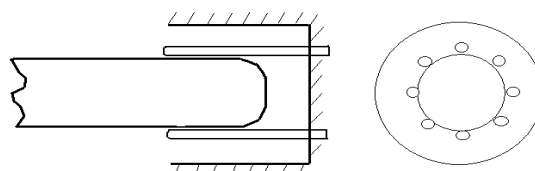


Рис. 5. The sections of elastic fixing

группу одинаковых вспомогательных УНТ-В меньшего радиуса так, чтобы центры их круглых поперечных сечений располагались на окружности, радиус которой равен сумме радиусов УНТ-О и УНТ-В

(рис. 5 – продольное и поперечное сечения упругой связи). Таким образом, в недеформированном состоянии УНТ-О будет касаться всех УНТ-В связи. Упругостью каждой УНТ-В связи определяется упругость связи в целом. На одном своем конце каждая УНТ-В жестко закреплена, в окрестности другого конца находится в контакте с УНТ-О. Прочность предлагаемой упругой связи обеспечивается тем, что все УНТ-В находятся внутри цилиндрической полости стенки, радиус которой несколько больше суммы радиуса УНТ-О и диаметра УНТ-В. Размеры цилиндрического слоя свободного пространства, находящегося между всеми УНТ-В и стенками цилиндрической полости, определяют степень свободы движения конца УНТ-О.

Упругое закрепление конца УНТ-О, упругое закрепление **второго типа**, связано с использованием двух параллельных прямоугольных графеновых пластин, жестко закрепленных по одной прямолинейной части границы своей срединной плоскости и имеющих контакт с УНТ-О, конец которой расположен между графеновыми пластинами в окрестности прямолинейных частей их границ, противоположных закрепленным частям их границ.

В предлагаемом упругом закреплении **третьего типа** используются УНТ-В, ось каждой из которых лежит в одной плоскости и является извилистой кривой линией. Технология изготовления таких УНТ-В описывается в работе [18]. Криволинейная УНТ-В [18] обладает подобно прямолинейной цилиндрической УНТ, упругостью, позволяющей реализовать двумя способами (рис. 6, 7) с помощью таких УНТ-В упругие закрепления концов УНТ-О. В упругих закреплении первых трех типов концы УНТ-О могут быть как закрытыми, так и открытыми.

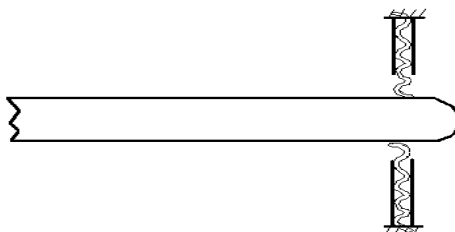


Рис. 6. Two curvilinear CNTs in elastic fixing



Рис. 7. Curvilinear CNT in elastic fixing

Для создания упругого закрепления **четвертого типа** открытых концов УНТ-О предлагается применять результаты работ [19, 20], в которых теоретически и экспериментально обоснованы технологии функционализации УНТ-О за счет присоединения к УНТ-О внешних по отношению к УНТ-О молекул COOH или COOCH_2Ph , $\text{COOCH}_2\text{NH}_2$, COOCH_2CN , $\text{COOCH}_2\text{NO}_2$, COOCH_3 . Эти молекулы на одном своем конце присоединяются к УНТ-О, а на другом закрепляются на некотором основании за счет химических связей с полимерной подложкой. Функционализация УНТ-О достигается приданием УНТ-О новых свойств за счет внедрения внутрь УНТ-О либо присоединения к ее поверхности внешних молекул. Экзохиральная функционализация заключается в присоединении молекул иной природы к внешней поверхности УНТ-О. Экзохиральная функционализация разделяется на нековалентную и ковалентную функционализацию. С точки зрения стабильности и прочности связи выигрывает ковалентная функционализация. Она осуществляется на оборванных сигма связях. В большинстве своем это - открытые концы УНТ-О либо дефекты УНТ-О. Таким образом, на открытых концах УНТ-О можно создавать практически любые прочные ковалентные связи с подходящими для использования конструкции составом внешних молекул и их упругостью. Это позволяет проводить по обоснованным в [19, 20] методикам техническую реализацию предложенной здесь модели резонансных детекторов и антенн на основе углеродных нанотрубок, упруго закрепленных на обоих концах.

Заключение

В данной работе показано направление дальнейшего совершенствования наноразмерных детекторов и антенн, основанное на использовании упругих закреплений концов УНТ-О и на анализе спектра частот свободных механических колебаний наноразмерных конструкций. Предложены способы технической реализации упругих закреплений концов УНТ-О, применение которых в рассматриваемой конструкции является необходимым. За счет конструктивных изменений детектора или антенны, путем введения дополнительных масс можно реализовать условия (6), (7), (8), (9) одновременного резонанса поступательных и вращательных колебаний (4), (5), (10), (11), (15), (16). Такая модернизация конструкции приводит к изменению спектра колебаний и повышению добротности электромеханических осцилляторов. Приведенный пример конструкции дает возрастание чувствительности детектора или принимающей антенны в случае внешнего излучения, а также дает возрастание мощности в случае излучающей антенны.

Выполнение условий (6), (7), (8), (9), (12), (13) может быть достигнуто не только включением в конструкцию компактных тел, но и использованием многослойных УНТ-О, слои которых располагаются неравномерно вдоль оси каждой УНТ-О. Многослойность УНТ-О должна проявляться ближе к обоим концам УНТ-О, причем число слоев должно

возрастать по мере приближения к концам УНТ-О. Увеличение неравномерной погонной массы такой УНТ-О при приближении к концам УНТ-О сделает величину момента инерции УНТ-О настолько большой, что выполнение второго условия (12) будет обеспечено.

Список литературы

- [1] *Leiman V.G., Ryzhii M., Satou A., Ryabova N., Rygii V., Otsuji T., Shur M.S.* // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 104. P.024514.
- [2] *Стебунов Ю.В., Лейман В.Г., Арсенин А.В., Гладун А.Д., Рыжгий В.И.* // Журнал технической физики. 2012. Том 82, вып. 1. С.67.
- [3] *Slepyan G.Ya., Maksimenko S.A., Lakhtakia A., Yevtushenko O., Gusakov A.V.* // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 60. P.17136.
- [4] *Burke P.J., Li S., Yu Z.* // IEEE. Trans. On Nanotech. 2006. Vol. 5. P.314.
- [5] *Maffucci A., Miano G., Villone F.* // Int. J. Circ. Theor. Appl. 2008. Vol. 36. P.17136.
- [6] *Purgo N.* // Glass Physics and Chemistry. 2005. Vol. 31. No. 4. P.535.
- [7] *Jensen K., Weldon J., Garcia H., Zettl A.* // Nano Letters. 2007. Vol. 7. No. 11. P.3508.
- [8] *Wang Y., Wu Q., Shi W., He X., Sun X., Gui T.* // Int. J. Infrared Milli Waves. 2008. Vol. 29. P.35.
- [9] *Firouz-Abadi R.D., Fotouhi M.M., Permoon M.R., Haddadpour H.* // J. Mechanical Science and Technology. 2012. Vol. 26(2). P.563.
- [10] *Михайлов И.С., Леонтьев В.Л.* // Труды X Международной конф. “Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы”, 25-28 августа 2008 г., Ульяновск: УлГУ, С.1.
- [11] *Ghorbanpour Arani A., Rahnama Mobaraken M., Shams Sh., Mohammadimehr M.* // J. Mechanical Science and Technology. 2012. Vol. 26(8). P.2565.
- [12] *Georgantzinou S.K., Giannopoulos G.I., Anifantis N.K.* // Comput. Mech.. 2009. Vol. 43. P.731
- [13] *Михайлов И.С., Леонтьев В.Л.* // Нано- и микросистемная техника. 2011. N9. С.48.
- [14] *Bockrath M.W.* Carbon nanotubes: electrons in one dimension Berkeley, Ph. D. Dissertation, 1990. 131 p.
- [15] *Bockrath M., Cobden D.H., Lu J., Rinzler A.G., Smalley R.F., Balents L., McEuen P.L.* // Nature. 1990. Vol. 397. P.598.
- [16] *Ishii H., Kataura H., Shiozawa H., Yoshioka H., Otsubo H., Takayama Y., Miyahara T., Suzuki S., Achiba Y., Nakatake M., Narimura T., Higaahiguchi M., Shimada K., Namatame H., Taniguchi M.* // Nature. 2003. Vol. 426. P.540.

- [17] *Burke P.J.* // IEEE. Trans. On Nanotech. 2002. Vol. 1. P.129.
- [18] *Geblinger N., Ismach A., Joselevich E.* // Nature Nanotechnology. 2008. Vol. 3. P.195.
- [19] *Wang F., Deng K.-J., Zhou L., Zhao J.-B., Ke X.-H., Wen L.-L.* // J. Inorg. Organomet. Polym. 2012. Vol. 22. P.1182.
- [20] *Beheshtian J., Peyghan A.A., Bagheri Z.* // J. Mol. Model. 2013. Vol.19. P.391.