

01 Вынужденные колебания углеродной нанотрубки с током эмиссии в электромагнитном поле

© С.В. Булярский,¹ А.А. Дудин,¹ А.П. Орлов,¹ А.А. Павлов,¹ В.Л. Леонтьев²

¹ Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН,
119334 Москва, Россия

² Ульяновский государственный университет,
432970 Ульяновск, Россия
e-mail: bulyar2954@mail.ru

(Поступило в Редакцию 2 марта 2017 г.)

Проанализирован процесс возникновения колебаний в одиночной углеродной нанотрубке, в которой протекает постоянный ток автоэлектронной эмиссии и которая помещена в электромагнитное поле. Экспериментально показано, что в нанотрубке кроме постоянного возникает переменная составляющая эмиссионного тока, обладающая резонансом на определенной частоте. Проведены расчеты, которые показывают связь частоты резонанса с параметрами системы и самой нанотрубки. Выполнен анализ условий, при которых резонанс можно сдвинуть в терагерцовый диапазон частот колебаний.

Введение

Углеродные нанотрубки обладают свойством поглощения и испускания электромагнитного излучения. Это открывает перспективу создания приемно-передающих устройств на их основе [1,2]. Данная способность нанотрубок проявляется в широком диапазоне длин волн от радиочастотного до оптического. Контакт углеродной нанотрубки с металлом катализатора выпрямляет [3], что позволяет использовать их в качестве ректен [4]. В связи с этим важно проанализировать условия возникновения колебательных процессов в нанотрубке и характеристики данных процессов.

Применение углеродных нанотрубок в радиоустройствах требует глубокого понимания природы физических свойств этих объектов. В настоящей работе обнаружено и описано физическое явление вынужденных колебаний углеродной нанотрубки в электромагнитном поле. Нанотрубка с током, помещенная в электромагнитное поле высокой частоты, начинает колебаться. При определенной частоте электромагнитного поля колебания нанотрубки испытывают резонанс, при этом амплитуда колебаний возрастает. Эти колебания оказывают влияние на автоэлектронную эмиссию с концов углеродных нанотрубок, находящихся в сильном электрическом поле, возбуждая высокочастотный эмиссионный ток. Это явление открывает перспективы создания усилителей электромагнитных колебаний, работающих на новых принципах.

Цель настоящей работы — выявить связь частотных характеристик системы с механическими параметрами нанотрубки. Это позволит определять указанные параметры с необходимой точностью, что является важным для практического использования радиочастотных свойств углеродных нанотрубок (УНТ).

Экспериментальные результаты

Для исследований частотных характеристик углеродных нанотрубок как элементов наноэлектроники был создан измерительный стенд и разработаны методики измерений вольт-амперных, эмиссионных и амплитудно-частотных характеристик УНТ в высокочастотных электромагнитных полях. Стенд был собран на базе растрового электронного микроскопа FEI HeliosNanoLab 650 DualBeam, позволяющий визуально наблюдать колебания нанотрубки и фиксировать момент резонанса.

В измерительной системе было задействовано три электрода (рис. 1). К катоду 1 крепилась углеродная нанотрубка. Анод 2 позволял измерять вольтамперную характеристику, когда нанотрубка его касалась, и эмиссионную характеристику, когда она была отодвинута от 2-го электрода на расстояние несколько десятков

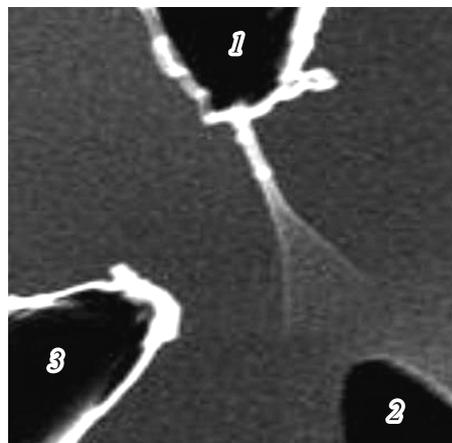


Рис. 1. Изображение исследуемой системы с углеродной нанотрубкой, которая находится в режиме резонанса вынужденных колебаний. 1 — катод с закрепленной нанотрубкой, 2 — анод, 3 — электрод, возбуждающий переменное магнитное поле.

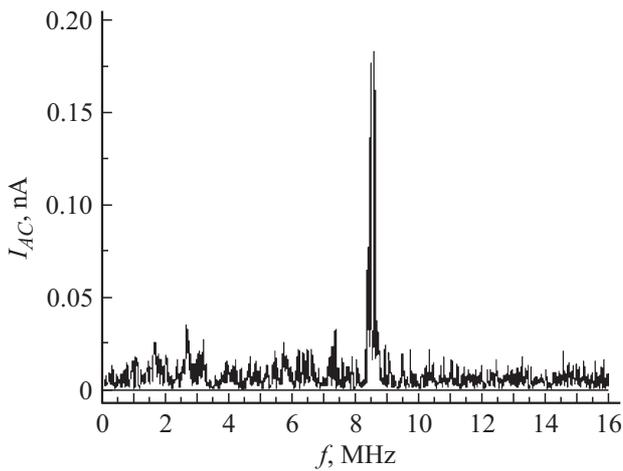


Рис. 2. Экспериментальный частотный спектр колебаний углеродной нанотрубки.

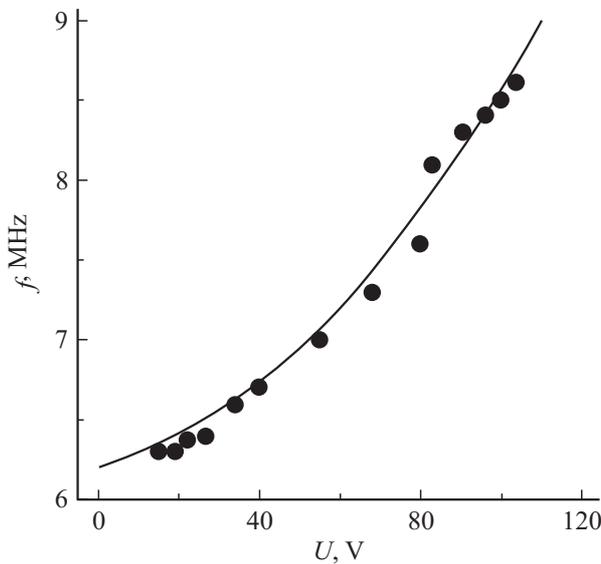


Рис. 3. Зависимость частоты резонанса вынужденных колебаний углеродной нанотрубки от приложенного электрического напряжения между катодом и анодом. Эксперимент — точки. Сплошная линия — расчет по формулам (1) и (2).

нанометров. На электрод 3 подавалось высокочастотное напряжение, которое создавало в пространстве, окружающем нанотрубку, электромагнитное поле.

На рис. 1 зафиксирован момент резонанса колебаний, когда по цепи электрод 1–нанотрубка–вакуум–электрод 2 протекает постоянный эмиссионный ток с величиной 100 нА. Ток, текущий через нанотрубку, взаимодействует с окружающим электромагнитным полем и нанотрубка начинает колебаться. В процессе колебаний расстояние между концом нанотрубки и анодом периодически изменяется. Это вызывает появление в эмиссионном токе переменной составляющей. На рис. 2 показана амплитудно-частотная характеристика этого переменного тока в указанной выше цепи. Полуширина

резонансной кривой составляет порядка 0.2 МГц, что говорит о достаточно высокой добротности процесса. Частота резонанса зависит от величины эмиссионного тока, а следовательно, и электрического напряжения между электродами 1 и 2 (рис. 3, точки). Это создает возможность управления приемно-передающими свойствами нанотрубки. Величина переменного тока между электродом 3 и катодом очень мала, так как электроды находятся в вакууме и их относительная емкость также мала. Поэтому возникновение переменной составляющей тока эмиссии можно рассматривать как усиление переменного тока определенной частоты. Коэффициент усиления максимален в режиме резонанса, которой можно управлять путем изменения напряжения между катодом и анодом.

Обсуждение результатов

На проводник с током, помещенным в магнитное поле, действует сила Ампера. В нашем случае эта сила изменяется с частотой вынуждающего сигнала, создаваемого электродом 3. В системе возникают вынужденные колебания. Для описания этого явления используем математическую модель динамического изгиба УНТ, жестко заземленной на одном конце ($x = 0$), свободной от кинематических связей на другом конце ($x = L$) и нагруженной постоянной продольной силой F [5]:

$$EJ \frac{\partial^4 W(x, t)}{\partial x^4} - F \frac{\partial^2 W(x, t)}{\partial x^2} + \rho S \frac{\partial^2 W(x, t)}{\partial t^2} = q(x, t). \tag{1}$$

Это уравнение решается с граничными условиями

$$W(0, t) = 0, \left. \frac{\partial W}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \left. \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right|_{x=L} = 0, \left. \frac{\partial^3 W}{\partial x^3} \right|_{x=L} = 0.$$

Здесь W — прогиб УНТ, E — модуль упругости УНТ, J — момент инерции УНТ, который вычисляется для полой нанотрубки (d_1, d_2 — диаметры внутренней и внешней поверхностей нанотрубки), ρ — плотность УНТ, S — площадь поперечного сечения УНТ, $q(x, t)$ — величина поперечной нагрузки, порождаемой электромагнитным полем. Начальные условия не указываются, поскольку исследование модели свелось к анализу свободных колебаний УНТ с указанными граничными условиями.

Для расчета были использованы следующие параметры УНТ: $L = 3450$ нм, $d_1 = 55$ нм, $d_2 = 57$ нм, $E = 10^{11}$ Па, $\rho = 2.26 \cdot 10^3$ кг/м³. Величина растягивающей УНТ продольной силы F , действующей на УНТ и определяемой электрическим напряжением между электродами 1 и 2, находилась по формуле [6]

$$F = \frac{\epsilon_0 S_{эл} V^2}{2h^2}, \tag{2}$$

где $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $S_{эл} = 1.13 \cdot 10^{-16}$ м², h — расстояние между электродом 2 и свободным концом УНТ.

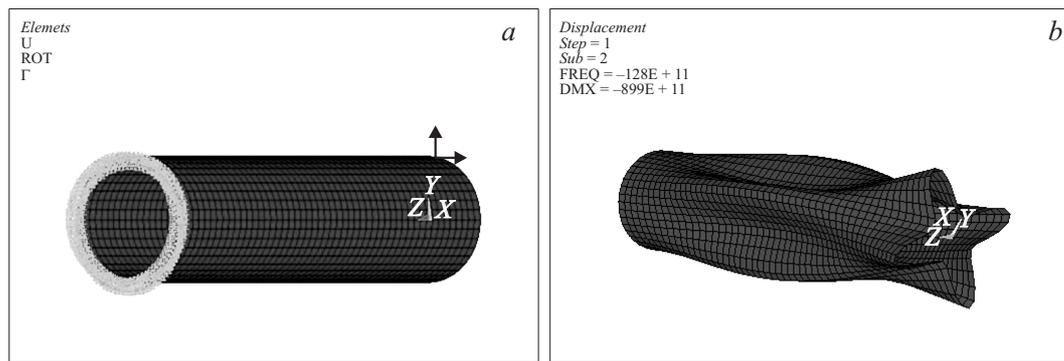


Рис. 4. Результаты расчета колебаний нанотрубки с закрепленным концом с малым аспектным отношением.

Значению $V = 110$ соответствует сила $F = 18 \cdot 10^{-10}$ N. В области $[0, 18 \cdot 10^{-10}]$ значений продольной силы F построена равномерная сетка с шагом $3 \cdot 10^{-10}$, содержащая семь узлов и шесть участков. Результаты решения задачи о свободных колебаниях прямолинейной в недеформированном состоянии УНТ, полученного методом конечных элементов, приведено на рис. 3 (сплошная кривая).

На рис. 3 (сплошная линия) приведена зависимость первой частоты свободных колебаний УНТ от электрического напряжения, которое определяет (задает) величину продольной силы. Расчет хорошо согласуется с экспериментом. Некоторое расхождение зависимостей, отображенных на рис. 3, имеется в окрестности точки $V = 80$ В, в которой в эксперименте наблюдается более резкое нарастание эмиссионного тока и, как следствие, увеличение силы, действующей на УНТ. Сравнение экспериментальных и расчетных результатов рис. 3 показывает, что наблюдаемая зависимость первой частоты свободных механических колебаний УНТ от величины вынуждающей силы является причиной зависимости резонансной частоты тока, протекающего по УНТ, от напряжения между электродами 1 и 2. Расчет показал, что аналогичная зависимость имеется для второй гармоники свободных колебаний УНТ и соответственно для второй резонансной частоты вынужденных колебаний УНТ под действием электромагнитного поля. Частота второго резонанса примерно в 5 раз превышает частоту первого резонанса.

Величиной частоты резонанса можно управлять, изменяя параметры нанотрубки. Особенно она чувствительна к аспектному отношению длины трубки к ее радиусу. При отношении $L/R = 2$ можно добиться резонанса в терагерцовом диапазоне. Изменяя аспектное отношение, можно добиться возникновения резонанса на нужной частоте от единиц МГц до ТГц.

Резонансная частота чувствительна и к иным параметрам нанотрубки. Уменьшение плотности за счет выращивания коротких двухстенных нанотрубок увеличенного диаметра и повышенного модуля Юнга позволяют достичь частот 5–10 ГГц, что подтверждается расчетами методом конечных элементов. Первая и вторая сим-

метричные формы свободных колебаний приводятся на рис. 4. Колебания имеют достаточно сложный характер. Расчет вынужденных колебаний УНТ выполнен в рамках оболочечной модели для случая, в котором на свободном краю оболочки действует внешняя гармоническая сила. Вектор силы имеет две ненулевые гармонические составляющие амплитуды 100 Па, направленные вдоль осей X и Y . Отклик на действие этой силы (резонанс), рассмотренный в узле сетки конечных элементов, находящемся посередине той образующей прямой линии цилиндрической срединной поверхности, которая проходит также через точку приложения внешней силы, характеризуется диапазоном от 11 до 12 ГГц.

Таким образом, методика расчетов в рамках оболочечной модели, позволила вычислить частоты резонанса низшей частоты свободных колебаний УНТ. Этим, во-первых, обоснована возможность использования развитой методики для получения оценок частот свободных колебаний УНТ, во-вторых, обоснована высокая степень достоверности тех результатов исследований свободных колебаний УНТ [7], с которыми проводилось сравнение, в-третьих, показано, что полученные в [7] выводы о возможности реализации ТГц механических свободных колебаний УНТ имеют высокую степень достоверности. Следовательно, реализация ТГц наноустройств на основе УНТ с использованием механических ТГц резонансов УНТ (до 9 ТГц) возможна. Для создания таких наноустройств, как показывают построенные здесь оценки, следует стремиться к использованию УНТ, у которых аспектное отношение является минимальными из области их возможных (в смысле технической реализации) значений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ 17-02-00276 и РНФ.

Список литературы

- [1] Rutherglen C., Burke P. // Nano Lett. 2007. Vol. 7. N 11. P. 3296–3299.
- [2] Jensen K., Weldon J., Garcia H., Zettl A. // Nano Lett. 2007. Vol. 7. N 11. P. 3508–3511.

- [3] Булярский С.В., Булярская С.А., Вострецова Л.Н., Дудин А.А., Орлов А.П., Павлов А.А., Басаев А.С., Кицюк Е.П., Шаманаев А.А., Шаман Ю.П. // Наномикросистемная техника. 2015. № 5 (158). С. 3–8.
- [4] Ketrá K., Rybczynski J., Huang Z., Gregorczyk K. // Adv. Mater. 2007. Vol. 19. P. 421–426.
- [5] Вибрации в технике: Справочник. В 6 томах / Ред. совет. предс. В.Н. Челомей. М.: Машиностроение, 1978. Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. 1978. 352 с.
- [6] Yong Z., Horacio D. // Int. J. RF and Microwave Computer-Aided Eng. 2004. Vol. 14. N 4. P. 317–328.
- [7] Леонтьев В.Л. // XI Всеросс. съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: Сб. докл. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2015. С. 2302–2303.