

Резонансные свойства спиральных углеродных нанотрубок

В.И. Демидчик, Р.В. Корнев

Белорусский государственный университет, Минск

E-mail: demidvi@bsu.by

Углеродные нанотрубки (УНТ) широко используются в различных отраслях промышленности. В настоящее время наряду с прямолинейными УНТ все больший интерес исследователи проявляют к спиралевидным УНТ [1, 2]. Размеры таких УНТ в ряде работ варьируются в следующих пределах: диаметр спирали – 144-830 нм, длина УНТ 5-50 мкм, диаметр УНТ – 0,3-0,8 нм. При этом установлено, что несмотря на внедрение дефектов в прямолинейную УНТ для придания ей спиралевидной формы, спиральные УНТ сохраняют свою термодинамическую и энергетическую устойчивость [3].

Одним из применений УНТ является их использование при создании радиопоглощающих материалов в качестве добавки в диэлектрическую матрицу. Взаимодействие электромагнитной волны (ЭМВ) с подобным композитом определяется характером взаимодействия ЭМВ с отдельной УНТ.

При решении задачи возбуждения прямолинейных УНТ электромагнитной волной с использованием интегрального уравнения (ИУ) Галлена [4], либо ИУ Левина-Леонтовича [5] установлено, что отклик УНТ носит резонансный характер, обусловленный их конечной длиной. При этом имеет место замедление волны тока распространяющейся вдоль УНТ: $V_\phi \approx 0,02c$, c – скорость света.

Определить влияние геометрии на токораспределение УНТ можно используя ИУ Поклингтона для проводников произвольной геометрии [6, 7]:

$$-j \frac{k}{Z_0} \cdot I(s) \cdot Z(s) + \int_L I(s') \cdot \left[k^2 G(s, s') \cdot \vec{s}^{0'} \cdot \vec{s}^0 - \frac{\partial^2 G(s, s')}{\partial s \partial s'} \right] ds' = -j \frac{k}{Z_0} \cdot E_\tau(s) \cdot Z(s) = \frac{1}{2\pi a \sigma_{cn}}. \quad (1)$$

При этом поверхностное сопротивление УНТ σ_{cn} определяется по аналогии с [4].

В результате решения по разработанной методике уравнения (1) и нахождения амплитудно-фазового распределения тока $I(s)$ были изучены резонансные свойства УНТ различной геометрии, обусловленные конечной длиной нанотрубок. Определены резонансные частоты в зависимости от геометрических параметров УНТ.

В качестве тестовой задачи определена зависимость максимальной амплитуды тока от частоты для прямолинейной УНТ длиной 20 мкм и

радиусом 2,712 нм, рис. 1. Полученные данные соответствуют приведенным в [4].

В работе исследованы резонансные свойства спиральных УНТ постоянной длины при изменении радиуса спирали и угла намотки. На рис. 2 показана, в частности, зависимость частоты первого резонанса от угла намотки спиральной УНТ длиной 20 мкм и радиусом спирали 450 нм.

Очевидно, что при фиксированных длине и радиусе спиральной УНТ уменьшение угла подъема спирали приводит к уменьшению эффективной длины УНТ. Это приводит к смещению резонансных частот в высокочастотную область, что и подтверждают результаты расчетов.

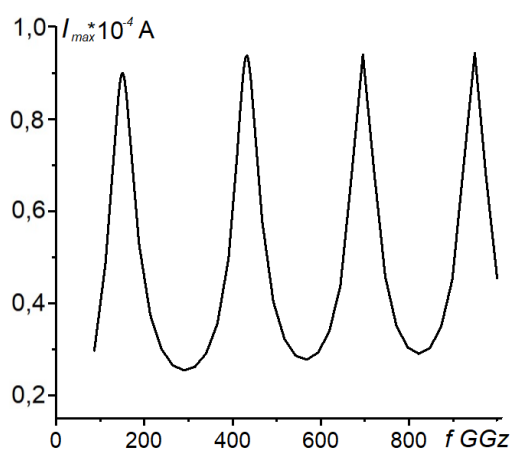


Рис. 1. Частотная зависимость максимальной амплитуды тока прямолинейной УНТ длиной 20 мкм

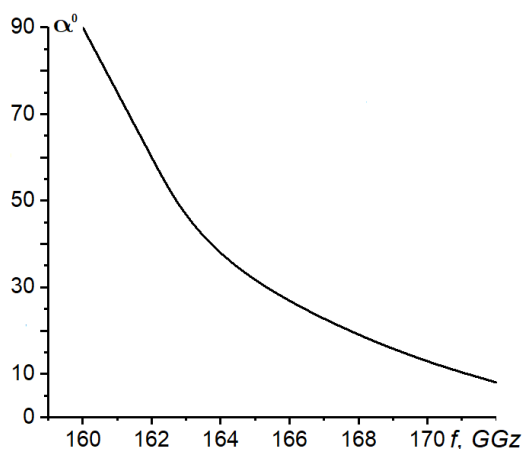


Рис. 2. Зависимость частоты первого резонанса спиральной УНТ длиной 20 мкм от угла подъема спирали

Информация об амплитудно-фазовом распределении тока одиночных УНТ, их резонансное взаимодействие с электромагнитным полем лежат в основе анализа структур, состоящих из множества подобных элементов, внедрённых в диэлектрическую матрицу.

1. Zhao D.-L., Shen Z.-M. // Materials Letters. 2008. No. 62. P. 3704–3706.
2. Siceo Ihara, Satoshi // Carbon, 1995. Vol. 33. No. 7. P. 931–939.
3. Kin Tak Lau, Mei Lu, David Hui // Composites: Part B. 2006. Vol. 37. P. 437–448.
4. Hanson G.W. // IEEE Transactions on antennas and propagation. 2005. Vol. 53. No. 11. P. 3426–3435.
5. Maksimenko S.A., Slepian G.Y. et al. // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 60. P. 17136–17149.
6. Демидчик В.И., Рунов А.В., Калашников Н.В. // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. 1983. Т. 26, № 3. С. 82–84.
7. Демидчик В.И., Корнев Р.В. // Сборник статей пятой Всероссийской научной школы-семинара «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами», Саратов, 2018. С. 150–152.