

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ НАНОРАДИО НА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ

Абрамов И. И., Лабунов В. А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Беларусь
e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

Аннотация — Проанализированы проблемы развития качественно нового направления в радиосвязи — разработки радиоприемников на основе углеродных нанотрубок. Выделены перспективные пути решения возникающих проблем.

I. Введение

Возможные применения углеродных нанотрубок (УНТ), судя по всему, будут достаточно широки вследствие их уникальных электрических, оптических, тепловых и механических свойств. Описание теоретических и экспериментальных исследований этих свойств в настоящее время уже посвящены десятки монографий и обзоров (см., например, [1]). Среди современных обзоров по использованию наноматериалов для радиофизики применительно к системам радиолокации и радиосвязи отметим статью [2]. Следует подчеркнуть, что особое внимание в ней уделено именно УНТ.

Целью данной работы является обзор достижений, установление и анализ проблем разработки радиоприемников на УНТ, а также выделение основных перспективных путей их решения.

II. Первые экспериментальные реализации радиоприемников на УНТ

Анализ имеющейся литературы позволяет выделить два типа радиоприемников на УНТ, а именно: 1) на единственной УНТ; 2) гибридное радио, когда отдельные компоненты реализуются на УНТ.

Группой ученых из США был разработан и реализован радиоприемник (в дальнейшем нанорадио) на одной УНТ (I – й тип) [3], причем УНТ использована в качестве основных компонентов радио, а именно: антенны, регулируемого полосового фильтра, усилителя и демодулятора. В качестве элемента питания применялся источник постоянного напряжения. Работоспособность нанорадио продемонстрирована в области частот 40 – 400 МГц при приеме речи и песни. Принципиальная структурная схема нанорадио приведена на рис. 1 (из работы [3]).

Поясним кратко принцип действия такого нанорадио. Прикладываемое к электродам напряжение (рис. 1) приводит к тому, что свободный конец УНТ становится отрицательно заряженным, а сама УНТ чувствительной к воздействию падающего электромагнитного поля (радиосигнала). Для этого как электроды, так и УНТ помещаются в вакуум. В целом устройство напоминает вакуумную электронную лампу. С одной стороны, вибрации заряженной УНТ существенны только когда падающая волна имеет частоту, соответствующую ее резонансной частоте. С другой стороны, холодная эмиссия электронов с острия колеблющейся УНТ, характеризующаяся нелинейностью, используется для детектирования, усиления и демодуляции сигнала. Так, механические вибрации УНТ модулируют ток холодной эмиссии, что может использоваться для детектирования сигнала. Усиление сигнала происходит вследствие уве-

личения тока ввиду прикладываемого постоянного напряжения к устройству. Ввиду нелинейности в процессе холодной эмиссии наблюдается также и демодуляция радиосигнала. Таким образом, четыре основных компонента радиоприемника компактно реализуются с помощью только одной вибрирующей и эмиттирующей УНТ!

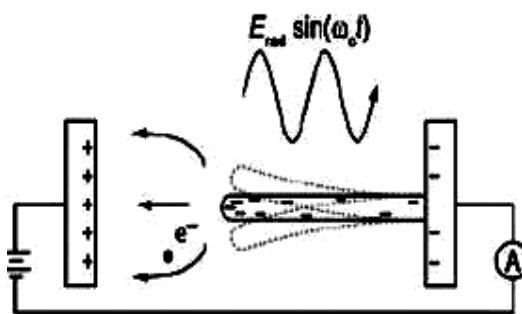


Рис. 1. Структурная схема нанорадио на единственной УНТ [3].

Fig. 1. Schematic of nanoradio based on single carbon nanotube [3]

Примером экспериментальной реализации гибридного радио (II – й тип) является работа [4]. В ней такой важный компонент радио как демодулятор реализован на единственной УНТ с двумя электродами. Рассматривался случай амплитудно-модулируемого сигнала с частотами модуляции до 100 кГц.

III. Основные проблемы

Анализ пионерских работ [3,4] и последующих публикаций позволяет выделить следующие ключевые проблемы при создании нанорадио на УНТ:

- 1). Большие прикладываемые напряжения;
- 2). Сложность настройки приемника на разные частоты;
- 3). Технологические, связанные с использованием УНТ;
- 4). Физики и моделирования.

IV. Перспективные пути решения проблем

Основными по разрешению комплекса отмеченных проблем 1 – 3, судя по всему, будут являться следующие подходы:

- 1) Усовершенствование структурной схемы нанорадио;
- 2) Создание гибридного радио, когда лишь отдельные компоненты реализуются на основе УНТ;
- 3) Технологические усовершенствования.

Поясним сказанное.

Так, для получения тока автоэлектронной эмиссии в работе [3] требовалось около 200 В. Это, конечно же, много (проблема 1). В связи с этим в работе [5] предлагается изменить основной механизм с холодной эмиссии на обычное туннелирование, а

для лучшей перестраиваемости частоты (проблема 2), использовать третий электрод (пример использования подхода 1). Принципиальная структурная схема показана на рис. 2 (из работы [5]).

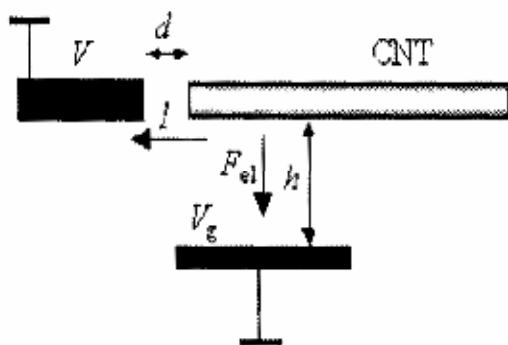


Рис. 2. Принципиальная схема нанорадио на туннельном эффекте ($d = 5$ нм) [5].

Fig. 2. Schematic representation of tunneling nanotube radio ($d = 5$ nm) [5]

В результате этих усовершенствований может быть уменьшено напряжение питания до 10 В (проблема 1). К сожалению, работоспособность схемы рис. 2 не подтверждена экспериментально.

В то же время в работе [4] с помощью создания гибридного радио (подход 2) экспериментально показано, что напряжение питания может быть снижено до 1,5 В (проблема 1).

Третья отмеченная проблема не является характерной только для создания нанорадио на УНТ, а является вообще типичной для технологических процессов изготовления разнообразных устройств на основе УНТ [1]. Поэтому здесь отметим лишь успешное экспериментальное подтверждение эффективности применения технологических усовершенствований, т.е. подхода 3. Так, в работе [6] с целью уменьшения влияния паразитных емкостей и решения проблем согласования импедансов предлагается в полевом транзисторе вместо одной УНТ в канале использовать параллельно расположенные УНТ. Экспериментальная реализация таких транзисторов применялась в гибридном радио в работе [7] (сочетание подходов 2 и 3).

Одной из ключевых является проблема физики и моделирования таких устройств (проблема 4). Очевидно, что без инструментария моделирования нанорадио доведение таких устройств даже до мелкосерийного производства будет просто невозможно. Они останутся всего лишь поделками. Так как нанорадио в виде, показанном на рис.1, является наномеханической системой, то для его моделирования, строго говоря, необходимо использовать квантовые модели. Очевидно, что на данном уровне развития вычислительной техники это попросту невозможно ввиду исключительно высокой степени сложности задачи. На настоящий момент времени, как правило, используются лишь упрощенные оценки [3 – 5], что допустимо для объяснения принципов работы нанорадио, однако малоприспособно для отмеченной выше цели. Достаточно строгие квантовые модели существуют лишь для отдельных устройств, а именно: транзисторов [7]. Более или менее строгая модель разработана и для антенн на основе УНТ для оптического диапазона [8]. К сожалению, в ней не учитываются механические колебания УНТ, принципиально важные в радиочастотном диапазоне [9].

Здесь лишь заметим, что физика работы антенны на основе УНТ качественно меняется по сравнению с таковой и известной для антенн на обычных проводках.

Учитывая очень высокую степень сложности задачи, перспективными к моделированию нанорадио на УНТ, как единого целого, будут являться:

- 1) Подход на основе иерархии различных моделей;
- 2) Многоуровневый подход.

Заметим, что эффективность первого подхода в наномеханике доказана на примере разработки и использования системы моделирования наномеханических приборов NANODEV [10, 11], созданной в БГУИР. Результаты, полученные с помощью этой системы, регулярно докладывались и обсуждались на конференциях КрыМиКо, начиная с 1996 года. Высокая эффективность второго подхода иллюстрируется на примере разработанной методики моделирования радиоприемника на УНТ, включая пучки УНТ, совместно с нашими коллегами из БНТУ в докладе [9].

Главным же направлением в решении всего спектра отмеченных проблем для достижения наилучшего результата должен являться комплексный подход, сочетающий отмеченные выше подходы, с привлечением специалистов из различных областей.

V. Заключение

Главное преимущество нанорадио на УНТ характеризуется известной оценкой, о том что его размеры могут быть уменьшены на 4 – 5 порядков по сравнению с достижимыми для известных промышленных технологий сегодняшнего дня. В связи с этим его применение может быть самым широким, начиная от медицины и заканчивая космосом, технологиями двойного назначения. Учитывая выделенные достаточно серьезные проблемы, ясно, что в настоящее время мы находимся лишь в самом начале пути. Авторы надеются, что отмеченные перспективные подходы к решению возникающих проблем будут способствовать ускорению внедрения нанорадио на УНТ в самые различные сферы деятельности человека.

VI. Список литературы

- [1] Дьячков П. Н. Электронные свойства и применение углеродных нанотрубок. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 488 с.
- [2] Микро – и наномеханика применительно к системам радиолокации и радиосвязи / П. П. Быстров, Ю. В. Гуляев, С. А. Никитов, А. В. Соколов // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 9. С. 11–50.
- [3] Nanotube radio / K. Jensen, J. Weldon, H. Garcia, A. Zettl // Nano Letters. 2007. Vol. 7. No. 11. P. 3508–3511.
- [4] Rutherglen C., Burke P. Carbon nanotube radio // Nano Letters. 2007. Vol. 7. No. 11. P. 3296–3299.
- [5] Dragoman D., Dragoman M. Tunneling nanotube radio // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 104. No. 7. P. 074314-3.
- [6] Burke P. J., Rutherglen C., Yu Z. Single – walled carbon nanotubes: Applications in high frequency electronics // Int. J. of High Speed Electron. and Syst. 2006. Vol. 16, No. 4. P. 977–999.
- [7] Carbon nanotube field – effect transistors / J. Guo, S. O. Koswata, N. Neophytou, M. Lundstrom // Int. J. of High Speed Electron. and Syst. 2006. Vol. 16. No. 4. P. 897–912.
- [8] Theory of multiwall carbon nanotubes as waveguides and antennas in the infrared and the visible regimes / M. V. Shuba, G. Ya. Slepian, S. A. Maksimenko, C. Thomsen, A. Lakhtakia // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 79. No. 15. P. 155403-17.

- [9] *Моделирование резонансного возбуждения электро-механических колебаний в радиоприемнике на углеродных нанотрубках* / И. И. Абрамов, В. В. Баркалин, Е. А. Белогуров, В. А. Лабунов, А. С. Чашинский // 21-я Международная Крымская Конференция "СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2011): материалы конф. (Севастополь, 12—16 сентября 2011 г.). Севастополь, 2011.
- [10] *Система моделирования нанoeлектронных приборов – NANODEV* / И. И. Абрамов, И. А. Гончаренко, С. А. Игнатенко, А. В. Королев, Е. Г. Новик, А. И. Рогачев // *Микроэлектроника*. 2003. Т. 32. № 2. С. 124—133.
- [11] *A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities* / I. I. Abramov, A. L. Baranoff, I. A. Goncharenko, N. V. Kolomejtseva, Y. L. Bely, I. Y. Shcherbakova // *Proc. of SPIE*. 2010. Vol. 7521. P. 75211E-11.

PROBLEMS AND PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT OF NANORADIO BASED ON CARBON NANOTUBES

Abramov I. I., Labunov V. A.
*Belarussian State University of Informatics
 and Radioelectronics*

6, P. Brovki str., Minsk, 220013, Belarus
 Ph.: +375-17-293-8877, e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

Abstract — The problems of development of radio receivers based on carbon nanotubes were analyzed. The main perspective ways of solution to address emerging issues were identified.

I. Introduction

Possible applications of carbon nanotubes (CNTs) are wide enough due to their electrical, optical, thermal and mechanical properties. A lot of monographs and reviews (see for example [1]) are now related to the description of the theoretical and experimental investigations of these properties. Among the contemporary reviews of the use of nanomaterials for radiophysics applied to radar and radio communication systems, we note the paper [2]. It must be emphasized that the main attention in the review is devoted to CNTs.

The aim of this paper is to review the results and analyze the problems of CNT radio development and to identify the most promising solutions.

II. The First Experimental Realization of the CNT Radio

The analysis of the literature allows us to identify two types of CNT radio, namely: 1) on a single carbon nanotube, and 2) a hybrid radio, when individual components are realized on the CNTs.

A group of scientists from the United States developed and implemented the radio (hereinafter nanoradio) on a single carbon nanotube (type I) [3], and CNT is used as the essential components of radio, namely: antenna, regulated bandpass filter, amplifier and demodulator. Let us explain briefly the operating principle of the nanoradio. Applying voltage to electrodes (Fig. 1) leads to the fact that the free end of CNT becomes negatively charged, and CNT itself becomes sensitive to the effects of the incident electromagnetic field (radiosignal). Thus, the mechanical vibrations of CNT modulate the current of field emission, which might be used to detect the signal. Signal gain is because of the increase in current due to DC voltage applied to the device. The signal demodulation is also observed due to the nonlinearity in the process of field emission. Thus,

four essential components of the radio are fully realized with the help of only one vibrating and emitting carbon nanotube!

Here we only note that the physics of antenna based on a carbon nanotube is changed dramatically compared to the one known for antenna on the conventional wires.

The example of experimental realization of the hybrid radio (type II) is [4]. In this case an important component of radio as a demodulator is implemented on a single CNT with two electrodes. The case of the amplitude - modulated signal with modulation frequency up to 100 kHz was considered.

III. Main Problems

The analysis of the pioneering works [3, 4] and subsequent publications allows us to identify the following key problems in the development of CNT nanoradio:

- 1). Large applied voltages;
- 2). the complexity of tuning of the receiver to different frequencies;
- 3). Technology associated with the use of CNTs;
- 4). Physics and simulation.

IV. Perspective Ways of Problem Solution

The following approaches will be important to the solution of the complex of mentioned problems 1 - 3:

- 1). Improvement of the structural scheme of nanoradio;
- 2). Creating a hybrid radio, when only some components are implemented on the basis of CNTs;
- 3). Technological improvements.

One of the key problems is the physics and simulation of such devices (problem 4). It is obvious that even small-scale production will be simply impossible without the appropriate simulators of nanoradio. Since nanoradio in the form shown on Figure 1 is a nanoelectromechanical system, strictly speaking, it is necessary to use all quantum models for its simulation. It is obvious that at time it is simply not possible to develop such models due to the very high degree of complexity of the problem. At present time, as a rule, only simplified models are used [3 – 5] in order to explain the principles of the nanoradio operating.

The following approaches will be promising to the simulation of CNT radio as a whole because of the very high degree of complexity of the problem:

- 1). An approach based on a hierarchy of different models;
- 2). Multiscale or multilevel approach.

Note that the efficiency of the first approach to nanoelectronics is proved by the example of a development and use of the system NANODEV for simulation of nanoelectronic devices [10, 11]. The results obtained with this system are regularly reported and have been discussed at conferences CriMiCo since 1996. High efficiency of the second approach is illustrated by the example of the developed simulation technique of CNT radio, including bundles of CNTs, together with our colleagues from Belarussian National Technical University in the paper [9].

But an approach, combining the above noted approaches, must be the main approach in the solution of mentioned problems to achieve the maximum possible result.

V. Conclusion

The main advantage of CNT nanoradio is characterized by well known estimate, according to which its size might be reduced by 4 – 5 orders of magnitude compared to achievable for well known industrial technologies. In this regard, its use might be very broad, ranging from medicine to space applications. It is clear that at present we are only at the very beginning because of rather serious problems. The authors hope that the above mentioned perspective approaches to solving the problems will help to accelerate the introduction of CNT nanoradio in different spheres of human activity.