

Величина электрической проницаемости слоя диэлектрика изменяет величину потенциала на поверхности полупроводника для одинаковых значений Φ_0 : потенциал на поверхности для $\epsilon_2 = 34,2$ в 1,7 раз больше, чем для $\epsilon_2 = 3,8$. Это приводит к значительному росту критического потенциала для малых ϵ_2 (рисунок 3), например, при $t_{ox} = 2a^*$ ($\approx 6,3$ нм в кремнии) $\Phi_{0C} \approx 231$ мВ для $\epsilon_2 = 3,8$ и $\Phi_{0C} \approx 95$ мВ для $\epsilon_2 = 34,2$. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете вероятности пробоя диэлектрика в поле затвора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Koenraad, P.M. Single dopants in semiconductors / P.M. Koenraad, M.E. Flatte // Nature materials. - 2011. - Vol. 10, № 2. - P. 91-100.
2. Charge state control and relaxation in an atomically doped silicon device / S.E.S. Andresen [et al.] // Nano Letters. - 2007. - Vol. 7, № 7. - P. 2000-2003.
3. Enhancing semiconductor device performance using ordered dopant arrays / T. Shinada [et al.] // Nature. - 2005. - Vol. 437, № 7062. - P. 1128-1131.
4. Calderon, M.J. External field control of donor electron exchange at the Si/SiO₂ interface / M.J. Calderon, B. Koiller, S. Das Sarma // Physical Review B. - 2007. - Vol. 75. - P. 125311.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ОТКЛИК СИСТЕМЫ ИЗ ДВУХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В МИКРОВОЛНОВОМ И ТЕРАГЕРЦОВОМ ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНАХ

А. В. Мельников

*НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета,
Alexander.Melnikov.v@gmail.com*

Представлена модель расчета электромагнитного отклика системы из двух электрически связанных углеродных нанотрубок (СУНТ). Рассчитаны спектры поляризуемости СУНТ при различных проводимостях контакта между трубками.

ВВЕДЕНИЕ

СУНТ представляет собой систему из двух УНТ, которые соприкасаются друг с другом в одном месте (контакте) и в общем случае ориентированы под произвольным углом друг относительно друга. СУНТ является элементарной ячейкой, в которой может наблюдаться влияние контакта между трубками на их электромагнитный отклик. Актуальность изучения СУНТ определяется тем, что из них могут быть составлены композитные материалы и электрические цепи, в которых углеродные нанотрубки (УНТ) электрически связаны между собой.

Нахождение электромагнитного отклика СУНТ производится через постановку и решение краевой электродинамической задачи с использованием метода интегральных уравнений [1]. Поверхностная проводимость УНТ находится на основе полуклассических и квантово-механических рассмотрений [1]. Проводимость контакта между УНТ вводится на основе рассмотрения Ландауэра [2]. В данном рассмотрении проводимость контакта определяется вероятностью прохождения электронов через контакт. Контактная разность потенциалов, между трубками, находится через рассеянные трубками поля. Токи, текущие по трубкам и ток, текущий через контакт между трубками, связаны через условия неразрывности. Ранее задача нахождения элек-

ромагнитного отклика СУНТ с учетом микроскопического описания проводимости контакта и электромагнитной связи между УНТ не решалась.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим систему из двух одностенных УНТ с длинами L_1 и L_2 и одинаковым радиусом R . Контакт между трубками расположен на расстоянии r_1 от одного из концов первой трубки и на расстоянии r_2 от одного из концов второй трубки. Угол между осями УНТ равен γ . На систему падает внешнее поле $E = E_0 \cdot \exp(i\omega t)$, где ω – циклическая частота. Угол между вектором внешнего поля и осью первой трубки равен β . Вектор внешнего поля перпендикулярен отрезку, соединяющему оси трубок. Расстояние между осями УНТ равно d . Оси трубок параллельны координатам z_1 и z_2 цилиндрических систем координат (ρ_1, φ_1, z_1) и (ρ_2, φ_2, z_2) , связанных с каждой УНТ. Внешнее поле возбуждает в системе осевые токи $j_1(z_1)$ и $j_2(z_2)$, текущие по поверхности УНТ и ток J , текущий через контакт между трубками. Рассеянные токами, текущими по поверхностям УНТ, поля представляются через электрический вектор Герца, который ориентирован параллельно осям трубок:

$$E_z^{(1,2)} = \left(\frac{\partial^2}{\partial z_{1,2}^2} + k^2 \right) \Pi_{1,2} \quad (1)$$

$$E_\rho^{(1,2)} = \frac{\partial^2 \Pi_{1,2}}{\partial \rho_{1,2} \partial z_{1,2}} \quad (2)$$

где k – волновой вектор. Для случая стационарного взаимодействия электромагнитного излучения с СУНТ, амплитуда токов, возбуждаемых в системе, может быть найдена через запись системы уравнений, основанной на применении закона Ома к каждому проводящему участку системы. Для одной из УНТ закон Ома записывается в следующем виде:

$$j(z) = (E_{0z}(z) + E^{(1)}(z) + E^{(2)}(z)) \cdot \sigma_{zz}, \quad (3)$$

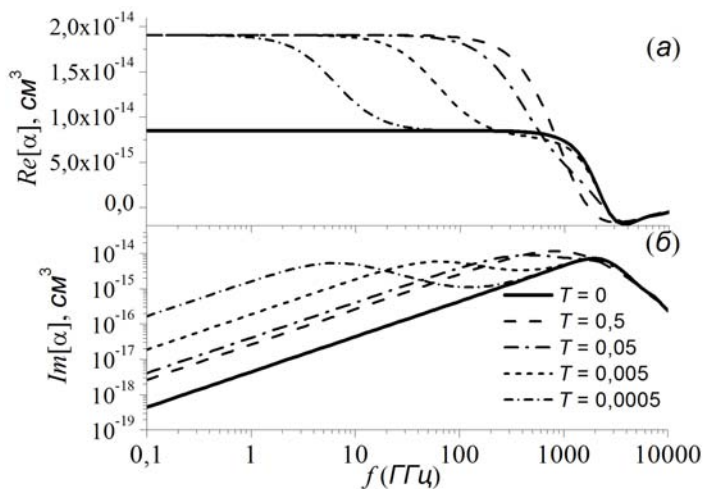
где E_{0z} – проекция внешнего поля на ось трубки, E_1 – поле, рассеиваемое токами, текущими в первой трубке, E_2 – поле, рассеиваемое второй трубкой. σ_{zz} – осевая проводимость УНТ. Закон Ома для контакта между трубками записывается через формулу Ландауэра [2]:

$$J = \frac{e^2}{\pi \hbar} \cdot T \cdot V \quad (4)$$

где T – коэффициент прохождения электрона через контакт между трубками V – контактная разность потенциалов между трубками. В месте контакта на каждой трубке применяется правило неразрывности для тока следующего вида: $J = j(z_{r-0}) - j(z_{r+0})$. Физически это условие означает отсутствие на малом участке больших величин заряда и соответствует выполнению закона сохранения заряда. Поставленная задача решается численно через приведение системы интегральных уравнений к матричному уравнению.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассчитаем компоненту тензора поляризуемости СУНТ для случая, когда вычисляемый дипольный момент сонаправлен с внешним полем. На рисунке представлены спектры поляризуемости СУНТ при различных значениях коэффициента прохождения электронов через контакт между трубками. Для случая, когда УНТ не связаны электрически, в мнимой части поляризуемости наблюдается пик на частоте 1 ТГц, который связан с эффектом конечной длины в каждой из трубок. Для случая сильной электрической связи между трубками ($T = 0.5$), амплитуда пика возрастает, частота уменьшается, что говорит о СУНТ, как о системе со свойствами более длинной одиночной УНТ. Для случая слабой электрической связи между трубками ($T = 0,005$ и $T = 0,0005$) в спектре $Im(\alpha)$ наблюдается два отдельных пика. Высокочастотный пик связан с эффектом конечной длины в каждой из трубок. Частота низкочастотного пика разделяет режимы сильного и слабого влияния контактного сопротивления на скорость перетекания электрического заряда с одной трубки на другую.



$$L_1 = L_2 = 1 \mu\text{м}, R = 0,5 \text{ нм}, r_1 = 100 \text{ нм}, r_2 = 900 \text{ нм}, d = 1,34 \text{ нм}, \gamma = \pi/2, \beta = \pi/4$$

Рисунок – Спектры поляризуемости СУНТ при различных значениях коэффициента прохождения электрона через контакт между трубками

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена модель расчета электромагнитного отклика системы из двух электрически связанных трубок. Рассчитаны и проанализированы спектры поляризуемости СУНТ при различных коэффициентах прохождения электронов через контакт между трубками. Показано, что СУНТ с сильной электрической связью ведет себя как одиночная УНТ большей длины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Theory of optical scattering by achiral carbon nanotubes and their potential as optical nanoantennas / G. Y. Slepyan [и др.]; Phys. Rev. B 60, 1999. – 17136 c.
2. Ventra, M. D. Electrical Transport in Nanoscale Systems / M. D. Ventra. – CAMBRIDGE UNIV PR, 2008 – c 101.