

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

УДК 535.13:535.14

НЕМИЛЕНЦЕВ
Андрей Михайлович

НЕЛИНЕЙНО- И КВАНТОВО-ОПТИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ В ОДНОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ
НАНОТРУБКАХ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.02 — теоретическая физика

Минск, 2009

Работа выполнена в научно-исследовательском учреждении «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Научный руководитель:

Максименко Сергей Афанасьевич
доктор физико-математических наук,
доцент, заведующий лабораторией электродинамики неоднородных сред, НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета

Официальные оппоненты:

Кишин Сергей Яковлевич
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий лабораторией квантовой оптики, ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси»

Борздов Георгий Николаевич
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры теоретической физики, физический факультет Белорусского государственного университета

Оппонирующая организация: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Защита состоится **15 мая 2009 г.** в 16³⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.02 при ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости 68; тел. 284-04-41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси».

Автореферат разослан «01» апреля 2009 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат физ.-мат. наук



Выблый Ю.П.

ВВЕДЕНИЕ

Углеродная нанотрубка (УНТ) представляет собой полую цилиндрическую макромолекулу, диаметр которой составляет несколько нанометров, а длина может достигать нескольких сантиметров. Расположение атомов углерода на поверхности УНТ можно представить свернув лист графена в цилиндр. В настоящее время нетривиальные физические свойства УНТ, обусловленные низкой размерностью данных структур, являются объектом интенсивных исследований. С точки зрения потенциальных применений в нано- и оптоэлектронике актуальным является изучение влияния квантового размерного эффекта на электронные и оптические свойства УНТ. В частности, продемонстрировано, что УНТ могут быть металлами или полупроводниками в зависимости от направления и длины вектора, вдоль которого осуществляется свёртывание. Причём ширину запрещённой зоны УНТ можно менять, помещая УНТ в статические электрические или магнитные поля, что существенно для создания на основе УНТ оптоэлектронных устройств с перестраиваемой рабочей частотой. Большой интерес представляет исследование теплового излучения УНТ как с целью создания когерентного источника теплового излучения на её основе, так и для изучения шумов элементов нанoeлектронных цепей на основе УНТ.

К настоящему моменту в ряде экспериментальных и теоретических работ было продемонстрировано сильная оптическая нелинейность УНТ. Однако, несмотря на определённые успехи в исследовании оптической нелинейности УНТ, до сих пор не создана последовательная теория, описывающая процессы нелинейного взаимодействия как металлических, так и полупроводниковых УНТ с электромагнитным полем в широком диапазоне частот и интенсивностей. Теоретические исследования продемонстрировали существенное влияние УНТ на перераспределение плотности фотонных состояний, перепутывание атомных состояний системы атомов, вставленной внутрь УНТ, силы Казимира между УНТ и плоскостью, УНТ и атомом. При этом не было учтено влияние краевых эффектов на квантово-оптические процессы в УНТ. Важной задачей при исследовании квантово-оптических процессов в УНТ является вычисление тензора Грина электромагнитного поля вблизи УНТ с учётом краевых эффектов. Одним из проявлений квантовой природы света являются тепловые флуктуации электромагнитного поля. До настоящего времени не изучалось влияние поверхностных волн на характеристики теплового излучения УНТ, хотя исследования теплового излучения фотонных кристаллов продемонстрировали, что оно может быть существенным.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами

Исследования, результаты которых вошли в диссертацию, проводились в Научно-исследовательском учреждении "Институт ядерных проблем" Белорусского Государственного Университета в рамках следующих НИР:

"Физические принципы и теория мономолекулярных приборов на основе углеродных нанотрубок" (ном. гос. рег. 20015208, сроки выполнения 2001 – 2005, договор Мин. обр. РБ)

"Квантовая электродинамика квазиодномерных структур углерода" (ном. гос. рег. 20015201, сроки выполнения 2003 – 2005, договор Мин. обр. РБ)

"Электронные и электромагнитные процессы в наноструктурах" (ном. гос. рег. 20023961, сроки выполнения 2002 – 2005, договор Мин. обр. РБ)

"Электромагнитные и транспортные свойства твердотельных наноструктур с резонансными электрон – фотонными и электрон – фононными состояниями" (ном. гос. рег. 20023720, сроки выполнения 2002 – 2004, договор ФФИ РБ Ф02Р-047)

"Электромагнитные и электрон-фононные процессы в мезосистемах" (ном. гос. рег. 20023721, сроки выполнения 2002 – 2004, договор ФФИ РБ Ф02-176)

"Квантово-оптические принципы создания наноразмерных устройств на основе квантовых точек" (ном. гос. рег. 20052176, сроки выполнения 2005 – 2007, договор БГУ)

"Квантовая оптика полупроводниковых квантовых точек" (ном. гос. рег. 20052174, сроки выполнения 2005 – 2007, договор ФФИ РБ Ф05 – 127)

"Роль локального поля в экситонных осцилляциях Раби полупроводниковых квантовой точки" (ном. гос. рег. 20043021, сроки выполнения 2004 – 2006, договор ФФИ РБ Ф04М – 078)

"Процессы взаимодействия света с углеродными наноструктурами и композитными материалами на их основе. Исследование электромагнитных характеристик наноуглеродных композитных материалов" (ном. гос. рег. 20062601, сроки выполнения 2006 - 2010, ГПОФИ "Наноматериалы и нанотехнологии задание 1.09)

"Физические основы квантовой оптики наноструктурированных систем" (ном. гос. рег. 20062611, сроки выполнения 2006 - 2010, ГКПНИ "Фотоника задание 1.21)

"Разработка методов создания наноразмерных источников на электрон-

ных пучках и экситонных композитах" (ном. гос. рег. 20066746, сроки выполнения 2006 - 2010, ГКПНИ "Электроника задание 1.23)

"Влияние замедления собственных волн одностеночных, многостеночных углеродных нанотрубок и пучков из них на электродинамические параметры этих объектов" (ном. гос. рег. 20071585, сроки выполнения 2007 - 2009, договор ФФИ РБ Ф07М-056)

"Эндоздральный металлофуллереновый пипод как вибраторная наноприемная антенна оптического диапазона: метод возбуждения, спектрально-угловые характеристики" (Проект INTAS Young Scientists PhD fellowship № 05-109-4595, сроки выполнения 2006 - 2008)

Тема диссертации соответствует пунктам 7.2 "Оптические методы исследования структуры и свойств вещества, атомно-молекулярные и плазменно-динамические процессы для получения новых материалов, приборов и наукоемких технологий" и 7.5 "Материалы с новыми свойствами, обеспечивающие создание опто-, микро- и наноэлектронных устройств, схемотехнические решения для построения таких устройств" перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006 – 2010 годы, утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь 17.05.2005 ном. 512.

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы. Целью диссертационной работы является:

1) Выявление особенностей нелинейно-оптических явлений, имеющих место в произвольных нехиральных УНТ в широком диапазоне частот и интенсивностей облучающего поля.

2) Установление влияния краевых эффектов на квантово-оптические процессы, протекающие в УНТ.

Для реализации поставленной цели ~~планируется~~ решить следующие *основные задачи*:

1) Получить кинетические уравнения, описывающие эволюцию матрицы плотности электронов в УНТ, облучаемой электромагнитным импульсом.

2) Разработать численные и аналитические методы решения данных уравнений и применить их для исследования процесса генерации высших гармоник, кубической оптической нелинейности и эффекта насыщения поглощения в УНТ.

3) Разработать методику вычисления тензора Грина электромагнитного

поля для УНТ с учётом краевых эффектов.

4) Вычислить корреляторы тепловых флуктуаций электромагнитного поля вблизи УНТ, используя флуктуационно-диссипационную теорему.

Объектом исследования является углеродная нанотрубка. *Предметом исследования* выступают процессы взаимодействия УНТ с классическими и квантовыми электромагнитными полями. Выбор данных объекта и предмета исследования обусловлен отражёнными во введении нетривиальными оптическими свойствами УНТ, а также перспективами применения данных свойств в опто- и наноэлектронике.

Положения выносимые на защиту

1. Кинетические уравнения, описывающие поведение электронной системы углеродной нанотрубки в электрическом поле произвольной формы, поляризованном вдоль оси УНТ. Возможность генерации высших гармоник в металлических углеродных нанотрубках, обусловленная плазмоподобным характером динамики носителей заряда. Влияние межзонных переходов на эффективность конверсии.
2. Сильная кубическая нелинейность металлических углеродных нанотрубок на частотах оптических резонансов, сравнимая по величине с кубической нелинейностью полупроводниковых углеродных нанотрубок и позволяющая реализовать пассивные затворы и фотонные переключатели.
3. Численно-аналитическое решение задачи рассеяния электромагнитного поля произвольной пространственной структуры на углеродной нанотрубке конечной длины с учётом её электронных свойств. Нахождение тензорной функции Грина электромагнитного поля в окрестности углеродной нанотрубки.
4. Качественное отличие теплового излучения металлических углеродных нанотрубок от излучения абсолютно чёрного тела, заключающееся в наличии резонансной структуры спектров и демонстрирующее сильное влияние краёв УНТ на распределение плотности фотонных состояний. Возможность создания тепловой антенны терагерцового и инфракрасного диапазонов на основе металлических углеродных нанотрубок.

Личный вклад соискателя

Исследования по тематике диссертации проводились в соавторстве с научным руководителем, заведующим лабораторией электродинамики неоднородных сред НИИ ЯП БГУ, д.ф.-м.н. С.А. Максименко и главным научным сотрудником этой же лаборатории, д.ф.-м.н. Г.Я. Слепяном. В исследовании процессов генерации высших гармоник и кубической нелинейности принимал участие к.ф.-м.н. А.А. Хрущинский. Постановка задачи, общее руководство осуществлялось доктором ф.-м.н. С. А. Максименко и д.ф.-м.н. Г.Я. Слепяном. Разработка формализма кинетических уравнений и исследование процессов генерации высших гармоник выполнялись совместно научным руководителем, д.ф.-м.н. Г.Я. Слепяном, к.ф.-м.н. А.А. Хрущинским. Остальные результаты, представленные в диссертационной работе, получены непосредственно соискателем. Физическая интерпретация и достоверность предсказанных эффектов обсуждались совместно с проф. Й. Херманом (Институт нелинейной оптики и короткоимпульсной спектроскопии им. Макса Борна, Берлин, Германия).

Автор выражает признательность научному руководителю, д.ф.-м.н. С.А. Максименко, д.ф.-м.н. Г.Я. Слепяну, к.ф.-м.н. А.А. Хрущинскому за помощь в работе над диссертацией; а также выражает благодарность профессору Й. Херману за обсуждение полученных результатов.

Результаты, полученные остальными соавторами, не включены в диссертацию.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты докладывались на следующих конференциях:

- Международная конференция «NANOMEETING - 2003. Physics, Chemistry and application of nanostructures». Минск, Беларусь. 20-23 мая 2003.
- Международный симпозиум «SPIE 48 Annual Meeting. Nanotubes and Nanowires». Сан Диего, Калифорния, США. 3-8 Августа 2003.
- Международная конференция «NANOMEETING - 2005. Physics, Chemistry and application of nanostructures». Минск, Беларусь. 24-27 мая 2005.
- Международная летняя научная школа «Carbon nanotubes: from basic research to nanotechnology». Созопол, Болгария. 21-31 мая 2005.

- 6-я международная конференция «Science and application of nanotubes». Гётеборг, Швеция. 26 июня - 1 июля 2005.
- Международная конференция «Nano-materials for electronics». Пун, Индия, 27-29 ноября 2006.
- Международная конференция «NANOMEETING - 2007. Physics, Chemistry and application of nanostructures». Минск, Беларусь. 22-25 мая 2007.
- Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике, «ICONO-2007». Минск, Беларусь. 28 мая - 1 июня 2007.
- Международная конференция «EMRS-2007 spring meeting». Страсбург, Франция, 28 мая - 1 июня 2007.
- Международная конференция «15 Central European Workshop on Quantum Optics». Белград, Сербия. 30 мая - 3 июня 2008.
- 12-я международная конференция «Mathematical Methods in Electromagnetic Theory». Одесса, Украина. 29 июня - 2 июля 2008.
- Международная конференция «Metamaterials 2008». Памплона, Испания. 21-26 сентября 2008.
- Международная конференция «TaCoNa-photonics 2008». Бад Хонейф, Германия. 3-5 декабря 2008.

Опубликованность результатов

По теме диссертационной работы опубликовано 17 работ, в числе которых 5 статей в научных журналах [1-5], 1 статья в коллективной монографии [6], 8 статей в сборниках трудов конференций [7-14] и три статьи в сборниках тезисов конференций [15-17]. Объем публикаций в научных журналах составляет 3.8 авторских листа. Объем других публикаций составляет 7.8 авторских листов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников. В главе 1 приводится аналитический обзор литературы по тематике диссертации и

детальное обоснование выбора направления исследований. В главе 2 получены кинетические уравнения для матрицы плотности π -электронов в УНТ, разработан численный метод решения кинетических уравнений и исследованы процессы генерации высших гармоник. В главе 3 кинетические уравнения решены методом возмущений и исследована кубическая оптическая нелинейность в УНТ. Эффект насыщения поглощения в УНТ исследован в приближении вращающейся волны. В главе 4 разработана методика вычисления тензора Грина, вычислено тепловое излучение однослойной углеродной нанотрубки.

Полный объем диссертации составляет 126 страниц; работа содержит 25 рисунков на 10 страницах и 2 таблицы, на 1 странице. Список использованных источников на 18 страницах включает 209 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В Главе 1 представлен обзор литературных данных по теме диссертации. В разделе 1.1 вводится понятие углеродной нанотрубки (УНТ) – полый цилиндрической углеродной макромолекулы, расположение атомов углерода на поверхности которой можно представить, свернув лист графена (монослой графита) в цилиндр. Пара целых чисел (m, n) , являющихся коэффициентами разложения вектора, вдоль которого происходит свертывание, по базисным векторам кристаллической решетки графена, полностью характеризует структуру и свойства УНТ. Обсуждаются электронные свойства УНТ. Демонстрируется, что УНТ являются металлами при $m-n=3q$, где q – целое число, и полупроводниками в остальных случаях. Проводится обзор возможных практических применений УНТ, среди которых особый интерес представляет создание на основе УНТ оптоэлектронных устройств (пассивные затворы, фотонные переключатели), элементов нанoeлектронных цепей (транзисторы, логические вентили), нанoантенн оптического и инфракрасного диапазонов.

В разделе 1.2 проведён анализ экспериментальных и теоретических работ, посвящённых исследованию оптических свойств УНТ, исходя из результатов которого делается вывод о сильной оптической нелинейности УНТ и выявляется ограниченность существующих теоретических подходов к исследованию процессов генерации высших гармоник и кубической нелинейности в УНТ. Отмечается отсутствие теории, описывающей эффект насыщения поглощения в УНТ. Анализируются трудности квантования электромагнитного поля в поглощающих средах, связанные с неэрмитовостью операторных уравнений Максвелла, и способы их преодоления. В частно-

сти, метод, предложенный Фогелем и Велшем и основанный на введении оператора шумового тока в уравнения Максвелла. Свёртка оператора шумового тока с тензором Грина электромагнитного поля системы определяет операторы электрического и магнитного полей. На основе данного метода в ряде теоретических работ предсказано существенное влияние бесконечно длинной УНТ на такие квантово-оптические процессы как эффект Парселла, перепутывание атомных состояний, эффект Казимира. Автором диссертационного исследования обосновывается необходимость учёта краевых эффектов при исследовании квантовой оптики УНТ, что требует вычисление тензорной функции Грина электромагнитного для УНТ конечной длины. Одним из проявлений квантовой природы света является тепловое излучение. Исходя из анализа теоретических работ, посвящённых исследованию теплового излучения фотонных кристаллов, делается вывод о существенном влиянии поверхностных возбуждений на характеристики теплового излучения. В связи с тем, что УНТ поддерживают распространение поверхностных волн, можно ожидать нетривиальных свойств теплового излучения УНТ.

На основании анализа проблем и достижений, проводимого в данной главе, формулируется цель работы и основные задачи исследования.

Генерация высших оптических гармоник в нехиральных УНТ, облучаемых интенсивным электромагнитным импульсом, исследуется в Главе 2.

В разделе 2.1 получены в одноэлектронном приближении кинетические уравнения, описывающие эволюцию матрицы плотности π -электронов в УНТ, облучаемой электромагнитным полем $E(t)$, поляризованным вдоль оси УНТ и распространяющимся перпендикулярно оси. В дипольном приближении для оператора взаимодействия электромагнитного поля с электронами УНТ эти уравнения имеют вид [1, 2]:

$$\frac{\partial \rho_{in}(t, \mathbf{p})}{\partial t} + eE(t) \frac{\partial \rho_{in}(t, \mathbf{p})}{\partial p_z} = -\frac{\rho_{in}(t, \mathbf{p}) - \rho_{eq}(\mathbf{p})}{T_1} + \frac{2ieE(t)R_{cn}(\mathbf{p})}{\hbar} (\rho_{vc}(t, \mathbf{p}) - \rho_{cv}(t, \mathbf{p})), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_{cv}(t, \mathbf{p})}{\partial t} + eE(t) \frac{\partial \rho_{cv}(t, \mathbf{p})}{\partial p_z} = -\left(\frac{1}{T_2} + i\omega_{cv}(\mathbf{p})\right) \rho_{cv}(t, \mathbf{p}) - \frac{ieE(t)}{\hbar} R_{cv}(\mathbf{p}) \rho_{in}(t, \mathbf{p}), \quad (2)$$

где ось УНТ предполагается ориентированной вдоль оси z координатной системы. Матричные элементы статистического оператора $\hat{\rho}$ вычислялись в базисе блоховских функций в двухзонном приближении, индексы v, c со-

ответствуют валентной зоне и зоне проводимости, $\mathbf{p} = (p_z, p_\phi)$ – квазимпульс электронов, причём компонента p_ϕ квантована. $\rho_{in} = \rho_{cc} - \rho_{vv}$ – динамическая инверсность, $\rho_{eq} = F(\mathcal{E}_c) - F(-\mathcal{E}_c)$ – равновесная инверсность, $F(\mathcal{E})$ – распределение Ферми, $\mathcal{E}_c(\mathbf{p})$ – дисперсионный закон π -электронов в УНТ, $T_{1,2}$ – продольное и поперечное времена релаксации, соответственно, $\omega_{cv} = 2\mathcal{E}_c/\hbar$ – частота межзонных переходов, R_{cv} – матричные элементы оператора дипольного момента электрона.

В разделе 2.2 получено выражение для плотности аксиального тока, индуцированного на поверхности УНТ облучающим полем. При этом выделено два вклада в плотность тока: вклад внутризонных движений электронов (в дальнейшем будем называть его квазиклассическим) [1, 2]

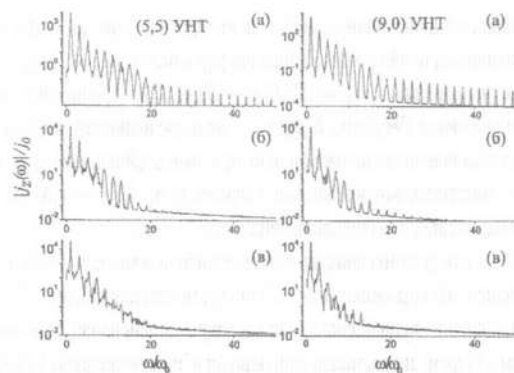
$$j_z^{(1)}(t) = \frac{2e}{(2\pi\hbar)^2} R_{cn} \sum_{s=1}^m \int \frac{\partial \mathcal{E}_c(\mathbf{p})}{\partial p_z} \rho_{in}(t, \mathbf{p}) dp_z \quad (3)$$

и вклад межзонных переходов (квантово-механический)

$$j_z^{(2)}(t) = \frac{2ie}{(2\pi\hbar)^2} R_{cn} \sum_{s=1}^m \int \omega_{cv}(\mathbf{p}) R_{cv}(\mathbf{p}) (\rho_{vc}(t, \mathbf{p}) - \rho_{cv}(t, \mathbf{p})) dp_z. \quad (4)$$

Интегрирование и суммирование в выражениях для плотности тока осуществляется по первой зоне Бриллюэна, представляющей в случае УНТ набор дискретных линий в связи с квантованием поперечного квазимпульса, R_{cn} – радиус УНТ.

В разделе 2.3 рассматривается взаимодействие металлической УНТ с гауссовым импульсом амплитуды E_0 , несущей частоты ω_0 и длительностью σ . Кинетические уравнения (1), (2) решаются численно методом конечных разностей и вычисляются спектры плотности аксиального тока (3), (4). Результаты вычислений, представленные на рисунке 1, демонстрируют сильную зависимость эффективности генерации высших гармоник от частоты облучающего поля. С увеличением несущей частоты фоновое излучение усиливается, генерация высших гармоник подавляется, а спектральные линии низших гармоники уширяются. Это обусловлено увеличением вклада межзонных переходов в плотность индуцированного в УНТ тока. В частности, исследование эволюции плотности тока во времени показало, что квазиклассическая и квантовомеханическая компоненты плотности тока являются величинами одного порядка; при этом квантовомеханическая компонента плотности тока сильно модулирована и смещена по фазе относительно квазиклассической компоненты плотности тока. При облучении



(а) $\omega_0 = 0.5\omega_{Ti}$, (б) $\omega_0 = \omega_{Ti}$, (в) $\omega_0 = 2\omega_{Ti}$. $\sigma = 4$, $\Lambda = 1$ для всех графиков.
 $\Lambda = 3beE_0/2\hbar\omega_0w_{cn}$, $j_0 = e\gamma_0/2\pi^2\hbar R_{cn}$. $b = 0.142$ нм, $\omega_{Ti} = 2.3 \times 10^{15}$ с $^{-1}$, $w_{cn} = \sqrt{3}$ для
 (m, 0) УНТ и $w_{cn} = 1$ для (m, m) УНТ.

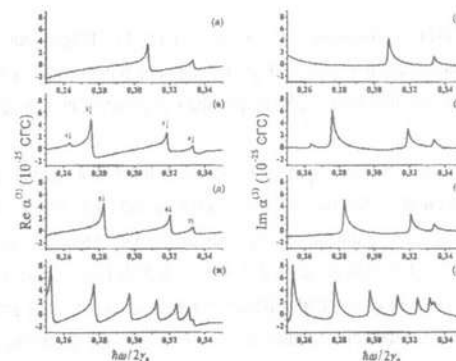
Рисунок 1 – Спектры плотности тока, индуцированного в металлических (9,0) и (5,5) УНТ, при разных значениях частоты облучающего поля

УНТ электромагнитным импульсом, частота которого совпадает с частотой плазменного резонанса в УНТ $\hbar\omega_p = 2\gamma_0$, $\gamma_0 = 2.7$ эВ, генерация высших гармоник практически полностью подавляется, в то время как высшие гармоники проявляются для частот облучающего поля, лежащих выше и ниже плазменной частоты. При этом исследование временной эволюции плотности тока показало, что плотность квантовомеханической компоненты тока не затухает после прохождения импульса, тем самым демонстрируя квантово-механическую природу плазмона в УНТ.

Результаты исследований, представленных в этой главе, опубликованы в [1, 2, 6–8, 10]

В главе 3 рассмотрено взаимодействие УНТ с монохроматическим электромагнитным полем.

В разделе 3.1 кинетические уравнения (1), (2) решены методом возмущений и получено выражение для поляризуемости третьего порядка для нехиральных УНТ $\alpha_{zzz}^{(3)}(-3\omega; \omega, \omega, \omega)$ [2]. Отличительной чертой спектров нелинейной поляризуемости УНТ, представленных на рисунке 2, является зависимость параметров резонансных линий (положение спектральных линий, расстояние между соседними линиями, их интенсивность) от типа УНТ, в частности, от радиуса. Значения поляризуемости металлических и полупроводниковых УНТ на резонансных частотах являются величинами одного порядка. Кроме того, в спектрах всех УНТ наблюдается один



(а,б) – (8,8) УНТ; (в,г) – (15,0) УНТ; (д,е) – (16,0) УНТ; (ж,з) – (38,0) УНТ.

Рисунок 2 – Спектры поляризуемости третьего порядка $\alpha_{zzz}^{(3)}(-3\omega; \omega, \omega, \omega)$ для различных типов УНТ

спектральный максимум, положение которого не зависит от типа УНТ и частота которого равна $\hbar\omega/2\gamma_0 = 1/3$. Этот максимум соответствует возбуждению поверхностного плазмона на частоте $\hbar\omega_p/2\gamma_0 = 1$. Данный результат согласуется с квантовомеханической природой плазменного резонанса, предсказанной в главе 2 диссертационного исследования. Следует отметить, что трёхкратное отличие частоты данной резонансной линии от частоты плазменного резонанса объясняется возбуждением плазмона за счёт трёхфотонного процесса поглощения. Рисунок 2 демонстрирует увеличение числа резонансов с ростом радиуса УНТ (смотри спектр поляризуемости для (38,0) УНТ на рисунке 2). Это означает, что в данном случае становится неприменимым параболическое приближение для дисперсионного закона π -электронов, так как оно предполагает наличие в спектре поляризуемости только одной резонансной линии. Вычислена кубическая восприимчивость композита полупроводниковых УНТ, состоящего из идентичных трубок. Продемонстрировано, что для резонансной линии в полупроводниковых УНТ, частота которой равна одной трети ширины запрещённой зоны, восприимчивость принимает значения порядка 10^{-7} СГС и быстро растёт с ростом радиуса УНТ.

В низкочастотной области, когда вклад межзонных переходов становится пренебрежимо малым, для описания движения электронов в металлических УНТ можно использовать кинетические уравнения Больцмана. Получено решение уравнения Больцмана в третьем порядке теории воз-

мушения и вычислена поляризуемость третьего порядка. Продemonстрировано, что результаты, полученные в рамках квазиклассического и квантовомеханического приближений, хорошо согласуются в диапазоне частот $\hbar\omega_1/2\gamma_0 < 0.005$.

В разделе 3.2 исследован эффект насыщения поглощения в УНТ, облучаемой монохроматическим полем, частота ω которого находится в окрестности частоты прямых резонансных переходов между сингулярностями Ван Хофа в плотности электронных состояний УНТ. С этой целью кинетические уравнения решены в приближении вращающейся волны и получено выражение для зависимости проводимости УНТ от интенсивности облучающего поля [5]:

$$\sigma(I) = -\frac{2e^2 T_2}{(2\pi\hbar)^2 R_{cn}} \sum_{s=1}^m \int \frac{(i\Delta(\mathbf{p})T_2 + 1) \omega_{cv}(\mathbf{p}) |R_{cv}(\mathbf{p})|^2 \rho^{eq}(\mathbf{p})}{\hbar[1 + T_2^2 \Delta^2(\mathbf{p}) + I/I_s(\mathbf{p})]} dp_z, \quad (5)$$

где $\Delta(\mathbf{p}) = \omega - \omega_{cv}(\mathbf{p})$, $I_s(\mathbf{p}) = c\hbar^2/8\pi e^2 |R_{cv}(\mathbf{p})|^2 T_1 T_2$. При выводе выражения (5) не учитывался вклад внутризонных движений в проводимость УНТ в связи с тем, что насыщение поглощения определяется межзонными переходами. Выражение (5) отличается от предсказанного для двухуровневых систем, описываемых оптическими уравнениями Блоха, в связи с тем, что матричные элементы оператора дипольного момента электронов в УНТ зависят от квази-импульса электронов и необходимо проводить усреднение по зоне Бриллюэна. Следует отметить, что основной вклад в выражение (5) вносят окрестности зоны Бриллюэна, для которых $\Delta(\mathbf{p}) = \omega - \omega_{cv}(\mathbf{p}) \ll \omega$, что обосновывает корректность применения приближения вращающейся волны для случая УНТ. Результаты вычислений продемонстрировали, что в полупроводниковых УНТ проводимость с ростом интенсивности поля уменьшается быстрее, чем в металлических.

Результаты, представленные в данной главе, опубликованы в [2, 5, 6, 8–10, 15, 17].

В четвертой главе исследуются квантово-оптические явления в УНТ с учётом краевых эффектов.

В разделе 4.1 разработана методика вычисления запаздывающей фотонной функции Грина вблизи УНТ конечной длины. При вычислениях использовалась калибровка, в которой скалярный потенциал электромагнитного поля равен нулю. В данной калибровке фотонная функция Грина представляет собой трёхмерный тензор второго ранга. В уравнениях, описывающих эволюцию тензора Грина $G_{\zeta\eta}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \omega)$ в декартовой системе координат вторая переменная $\mathbf{r}'$ и второй индекс η играют роль параметров.

В связи с этим тензор Грина, при заданном индексе η , можно рассматривать как электрическое поле создаваемое в точке $\mathbf{r}$ дельта-источником тока, расположенным в точке $\mathbf{r}'$ и поляризованным вдоль оси η декартовой системы координат. Таким образом, для вычисления тензора Грина необходимо решить задачу рассеяния на УНТ трёх векторных полей, излучённых источником тока, поляризованным вдоль каждой из осей декартовой системы координат. Применяя векторную теорему Грина и двусторонние импедансные граничные условия [6] можно показать, что тензор Грина определяется выражением [3, 4]:

$$G_{\zeta\eta}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = G_{\zeta\eta}^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) + \frac{i\omega R_{cn}}{c^2} \int_{-L/2}^{L/2} j_z^{(\eta)}(z; \mathbf{r}_2) \int_0^{2\pi} G_{\zeta z}^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_{cn}, \omega) d\phi dz, \quad (6)$$

где плотность тока $j_z^{(\eta)}(z; \mathbf{r}_2)$, индуцированного в УНТ тензором Грина свободного пространства $G_{\zeta\eta}^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)$, является решением интегрального уравнения

$$\begin{aligned} & \int_{-L/2}^{L/2} j_z^{(\eta)}(z'; \mathbf{r}_2) \mathcal{K}(z - z') dz' + C_1 e^{-ikz} + C_2 e^{ikz} \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{e^{ik|z-z'|}}{2ik} \int_0^{2\pi} G_{z\eta}^{(0)}(\mathbf{r}'_{cn}, \mathbf{r}_2, \omega) d\phi' dz', \end{aligned} \quad (7)$$

L, R_{cn} – длина УНТ и её радиус. Константы $C_{1,2}$ определяются условиями на ребре $j_z(-L/2) = j_z(L/2) = 0$. Ядро интегрального уравнения имеет вид

$$\mathcal{K}(z) = \frac{e^{ik|z|}}{2ik\sigma_{zz}} + \frac{R_{cn}}{i\omega} \int_0^{2\pi} \frac{e^{ikr}}{r} d\phi, \quad (8)$$

где σ_{zz} – поверхностная проводимость УНТ, определённая в [6]. Интегральное уравнение решено численно методом квадратур.

В разделе 4.2 исследуются статистические свойства тепловых флуктуаций электромагнитного поля вблизи УНТ конечной длины. Для вычисления корреляционных функций гейзенберговских операторов электромагнитного поля, находящегося в тепловом равновесии с УНТ, используется флуктуационно-диссипационная теорема. Разработан метод вычисления теплового излучения УНТ, помещённой в холодную среду. Предсказано существенное отличие характеристик теплового излучения УНТ от характеристик излучения абсолютно чёрного тела, заключающееся в наличии узких пиков в спектрах теплового излучения металлических УНТ конеч-

Основные научные результаты диссертации

В данной диссертации построена теория, описывающая нелинейно-оптические процессы в полупроводниковых и металлических нехиральных УНТ. Исследовано влияние краевых эффектов на квантово-оптические процессы в УНТ.

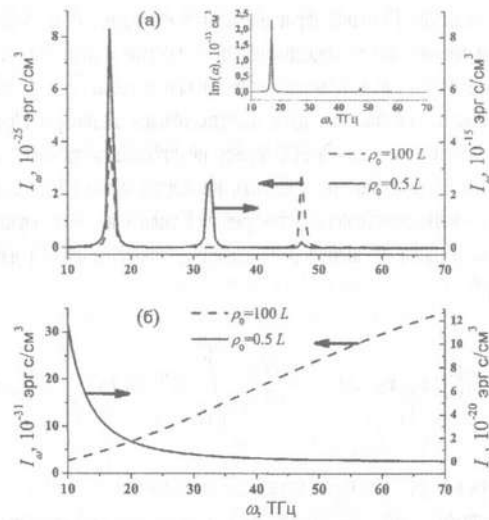
1) Сформулирована система кинетических уравнений, описывающая эволюцию матрицы плотности π -электронов в УНТ, облучаемой электромагнитным полем распространяющимся перпендикулярно оси УНТ и поляризованным вдоль её оси. Получено выражение для плотности аксиального тока, индуцированного на поверхности УНТ, облучающим полем. [1, 6, 8]

2) Численно решена система кинетических уравнений и вычислены спектры плотности аксиального тока, индуцированного в металлических УНТ интенсивным гауссовым импульсом. Продemonстрирована генерация высших гармоник. Предсказано уменьшение числа наблюдаемых гармоник с увеличением частоты облучающего импульса. Продemonстрировано практически полное подавление генерации высших гармоник на частоте плазменного резонанса. [1, 2, 6–8, 10]

3) Получено решение кинетических уравнений в третьем порядке теории возмущений. Вычислена поляризуемость третьего порядка, описывающая эффекты генерации третьей гармоники и самовоздействия. Продemonстрирована резонансная структура спектров кубической поляризуемости, причём параметры резонансных линий сильно зависят от типа УНТ. Предсказана сильная кубическая нелинейность металлических УНТ, сравнимая с кубической нелинейностью полупроводниковых УНТ. [2, 6, 9, 10, 15].

4) Исследован эффект насыщения поглощения в УНТ. Система кинетических уравнений решена в приближении вращающейся волны для случая, когда частота облучающего поля равна частоте прямых межзонных переходов π -электронов между сингулярностями Ван Хофа в УНТ. Получено выражение для зависимости проводимости УНТ от интенсивности облучающего поля. [5, 17].

5) Разработана методика вычисления тензорной функции Грина электромагнитного поля для УНТ конечной длины. Методика основана на решении краевой задачи для уравнений Максвелла с двухсторонними импедансными граничными условиями, учитывающими реальную электронную структуру углеродных нанотрубок. Используя векторную теорему Грина, краевая задача сведена к интегральным уравнениям Фредгольма первого



(а) – тепловое излучение металлической (15,0) УНТ в поперечном сечении $z_0 = 0$ и на расстоянии ρ_0 от оси УНТ; на вставке изображена поляризуемость (15,0) УНТ; (б) – тоже для полупроводниковой (23,0) УНТ. Температура УНТ $T = 300$ К.

Рисунок 3 – Спектры плотности энергии теплового электрического поля, излучённого УНТ

ной длины как в ближней, так и в дальней зонах (рисунок 3). Данные пики возникают из-за геометрических резонансов поверхностных волн на краях УНТ. Следует отметить, что часть пиков сохраняется в дальней зоне, хотя поверхностные плазмоны быстро затухают при удалении от поверхности УНТ. Сохранение данных резонансов связано с тем фактом, что собственные моды УНТ представляют собой суперпозицию поверхностных волн и волн излучения. Предложена концепция тепловой антенны терагерцового и ИК диапазонов на основе металлических УНТ, для возбуждения которой можно использовать нагрев УНТ низкочастотным электрическим током. В спектрах полупроводниковых УНТ резонансные линии не наблюдаются в связи с более сильной диссипацией поверхностных плазмонов. Таким образом, продemonстрировано, что краевые эффекты в металлических УНТ оказывают существенное влияние на распределение плотности фотонных состояний, а следовательно и на квантово-оптические свойства УНТ.

Результаты, представленные в данной главе, опубликованы в работах [3, 4, 6, 11–14, 16].

рода, которые решены численно методом квадратур. [3, 4, 6, 12–14, 16].

6) С использованием флуктуационно-диссипационной теоремы вычислены корреляторы тепловых флуктуаций электромагнитного поля вблизи УНТ. Предсказана резонансная структура спектров теплового излучения металлических УНТ, обусловленная геометрическими резонансами поверхностных волн на краях УНТ. Резонансы в спектрах теплового излучения полупроводниковых УНТ отсутствуют в связи с сильным затуханием поверхностных волн. [3, 4, 6, 11–14, 16].

Рекомендации по практическому использованию

Предсказание генерации высших гармоник в УНТ делает возможным использование материалов на основе УНТ для создания наноразмерных источников когерентного ультрафиолетового излучения. Большие резонансные значения кубической поляризуемости УНТ, наряду с малыми временами релаксации электронов, позволяет использовать УНТ для создания фотонных переключателей и пассивных затворов с перестраиваемой рабочей частотой. Перестройка частоты достигается за счёт изменения ширины запрещённой зоны УНТ путём приложения к УНТ механических напряжений, либо статических электрических или магнитных полей. Наличие изолированных резонансных линий в спектрах теплового излучения УНТ позволяет рекомендовать их к использованию в качестве тепловых антенн. Высокая тепловая стабильность и проводимость УНТ позволяет возбуждать тепловую антенну путём нагрева её постоянным током, а модуляцию сигнала проводить путём нагрева низкочастотным переменным током.

Можно выделить два основных направления дальнейшего развития предложенных научных результатов. Первое состоит в разработке теории нелинейного оптического композита УНТ с целью моделирования пассивных затворов на основе УНТ и их практического внедрения в области лазерных технологий. Второе состоит в применении квантовой оптики УНТ с учётом краевых эффектов к исследованию в УНТ конечной длины эффекта Парселла, эффекта Казимира, поверхностно усиленного рамановского рассеяния и т.д..

Статьи в научных журналах

1. High-order optical harmonic generation on carbon nanotubes: quantum-mechanical approach / G.Ya. Slepyan, A.A. Khrutchinskii, A.M. Nemilentsau, S.A. Maksimenko, J. Herrmann // *Int. J. Nanosci.* — 2004. — Vol. 3, № 3. — P. 343–354.
2. Third-order optical nonlinearity of single-wall carbon nanotubes / A.M. Nemilentsau, G.Ya. Slepyan, A.A. Khrutchinskii, S.A. Maksimenko // *Carbon.* — 2006. — Vol. 44, № 11. — P. 2246–2253.
3. Nemilentsau, A.M. Thermal radiation from carbon nanotubes in the terahertz range / A.M. Nemilentsau, G.Ya. Slepyan, S.A. Maksimenko // *Phys. Rev. Lett.* — 2007. — Vol. 99, № 14. — P. 147403-1–147403-4.
4. Carbon nanotube antenna: far-field, near-field and thermal-noise properties / S.A. Maksimenko, G.Ya. Slepyan, A.M. Nemilentsau, M.V. Shuba // *Physica E.* — 2008. — Vol. 40, № 7. — P. 2360–2364.
5. Немиленцев, А.М. Эффект насыщения поглощения в однослойных углеродных нанотрубках / А.М. Немиленцев, Г.Я. Слепьян, С.А. Максименко // *Вестник БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика.* — 2008. — № 3. — P. 18–23.

Статьи в коллективных монографиях

6. Electromagnetic waves in carbon nanostructures / S.A. Maksimenko, G.Ya. Slepyan, K.G. Batrakov, A.A. Khrushchinsky, P.P. Kuzhir, A.M. Nemilentsau, M.V. Shuba // *Carbon Nanotubes and Related Structures* / editors: V. Blank, B. Kulnitskiy. — Kerala, India: Research Signpost, 2008. — Chapter 6. — P. 147–187.

Материалы конференций

7. High-order harmonic generation by carbon nanotubes: density matrix approach / G.Ya. Slepyan, S.A. Maksimenko, A.A. Khrutchinski, A.M. Nemilentsau and J. Herrmann // *Physics, Chemistry and Applications of Nanostructures: Reviews and Short Notes to Nanomeeting 2003*, Minsk,

20–23 May 2003 / World Scientific; editors: V.E. Borisenko, S.V. Gaponenko and V.S. Gurin. — Singapore, 2003. — P. 178–181.

8. Harmonic generation in carbon nanotubes: quantum-mechanical approach / S.A. Maksimenko, G.Ya. Slepyan, A.A. Khrutchinski, A.M. Nemilentsau, J. Herrmann // Proceedings of SPIE: Nanotubes and Nanowire, San Diego, 3–8 August 2003 / SPIE; editors: A. Lakhtakia, S.A. Maksimenko. — Bellingham, WA, 2003. — Vol. 5219. — P. 33–44.

9. Self-action of surface currents in single-wall carbon nanotube / G.Ya. Slepyan, A.A. Khrutchinski, A.M. Nemilentsau, S.A. Maksimenko // Physics, Chemistry and Applications of Nanostructures: Reviews and Short Notes to Nanomeeting 2005, Minsk, 24–27 May 2005 / World Scientific; editors: V.E. Borisenko, S.V. Gaponenko and V.S. Gurin. — Singapore, 2005. — P. 227–230.

10. Third-order nonlinearity and plasmon properties in carbon nanotubes / A.M. Nemilentsau, G. Ya. Slepyan, A.A. Khrutchinski, S.A. Maksimenko // Proceedings of the NATO Advanced Study Institute: Carbon Nanotubes: from Basic Research to Nanotechnology, Sozopol, Bulgaria, 21–31 May 2005 / Springer, NATO Science Series, Series II: Mathematics, Physics and Chemistry; editors V.N. Popov, Ph. Lambin. — 2006. — Vol. 222. — P. 175–176.

11. Nemilentsau, A.M. Thermal radiation of a single-wall carbon nanotube / A.M. Nemilentsau, G.Ya. Slepyan, S.A. Maksimenko // Physics, Chemistry and Applications of Nanostructures: Reviews and Short Notes to Nanomeeting 2007, Minsk, 22–25 May 2007 / World Scientific; editors: V.E. Borisenko, S.V. Gaponenko and V.S. Gurin. — Singapore, 2007. — P. 241–244.

12. Nemilentsau, A.M. Near-field and far-field effects in thermal radiation from metallic carbon nanotubes / A.M. Nemilentsau, G.Ya. Slepyan, S.A. Maksimenko // Proceedings of SPIE: ICONO 2007: Novel Photonics Materials; Optics and Optical Diagnostics of Nanostructures, Minsk, 28 May – 1 June 2007 / SPIE; editors: O.A. Aktsipetrov [et al.]. — Bellingham, WA, 2007. — Vol. 6728. — P. 672809-1–672809-10.

13. Electromagnetic theory of nanodimensional antennas for terahertz, infrared and optical regimes / G.Ya. Slepyan, M.V. Shuba, A.M. Nemilentsau, S.A. Maksimenko // Conference Proceedings: MMET 2008: International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Odessa, 29 June – 2 July 2008 / IEEE. — 2008. — P. 118–123.

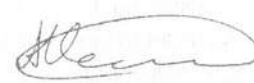
14. Electrodynamical theory of carbon nanotube based metamaterials for terahertz, infrared and optical regimes / G.Ya. Slepyan, S.A. Maksimenko, M.V. Shuba, A.M. Nemilentsau // Conference Proceedings: Metamaterials 2008, Pamplona, 21–26 September 2008 / P. 030340-1–030340-3.

Тезисы конференций

15. Third-Order Nonlinearity In Carbon Nanotubes: Modeling And Comparison With Experiments / S.A. Maksimenko, G. Ya. Slepyan, A.M. Nemilentsau, A.A. Khrutchinski // Book of Abstracts: 6th International Conference on the Science and Application of Nanotubes NT'05, Göteborg, 26 June 26 – 1 July 2005 / Göteborg, Sweden, 2005. — P. 356.

16. Nemilentsau, A. Photonic density of states in the vicinity of finite-length single-wall carbon nanotube / A. Nemilentsau, G.Ya. Slepyan, S.A. Maksimenko // Book of abstracts: CEWQO 2008: 15 Central European Workshop on Quantum Optics, Belgrade, 30 May – 03 June 2008 / Institute of Physics; editors: M. Bozic, D. Arsenovic. — Belgrad, 2008. — P. 70–71.

17. Nemilentsau, A.M. Computer modelling of carbon nanotubes based passive Q-switches for waveguide lasers / A.M. Nemilentsau, G.Ya. Slepyan, S.A. Maksimenko // Abstract booklet: International conference TaCoNa-photonics 2008, Bad Honnef, 3–5 December 2008 / Bad Honnef, Germany, 2008. — P. 56.



Немиленцев Андрей Михайлович

Нелинейно- и квантово-оптические процессы в однослойных углеродных нанотрубках

Ключевые слова: углеродная нанотрубка (УНТ), кинетические уравнения, генерация высших гармоник, кубическая нелинейность, эффект насыщения поглощения, тензор Грина, тепловое излучение.

Цель диссертационной работы – выявление особенностей нелинейно-оптических явлений, имеющих место в произвольных нехиральных УНТ в широком диапазоне частот и интенсивностей облучающего поля; установление влияния краевых эффектов на квантово-оптические процессы, протекающие в УНТ.

В данной работе сформулированы кинетические уравнения, описывающие поведение электронной системы УНТ в электрическом поле произвольной формы, поляризованном вдоль оси УНТ. Разработаны методы численного и аналитического решения данных уравнений. Предсказана эффективная генерация высших гармоник металлической УНТ, облучаемой гауссовым импульсом, причём эффективность генерации уменьшается с ростом несущей частоты импульса. Предсказана сильная кубическая нелинейность металлических УНТ, причём значения кубической поляризуемости металлических УНТ на частотах оптических резонансов, сравнимы по величине со значениями кубической поляризуемости полупроводниковых УНТ. Исследован эффект насыщения поглощения в УНТ. Большие резонансные значения кубической поляризуемости УНТ позволяют рекомендовать УНТ для создания фотонных переключателей и пассивных затворов.

Разработана методика вычисления тензора Грина электромагнитного поля для УНТ, основанная на решении краевой задачи для уравнений Максвелла с двухсторонними импедансными граничными условиями. Краевая задача сведена к интегральным уравнениям Фредгольма первого рода, которые решены численно методом квадратур. Предсказана резонансная структура спектров теплового излучения металлических УНТ, обусловленная геометрическими резонансами поверхностных волн на краях УНТ. Предложена концепция тепловой антенны на основе УНТ.

Nemilentsau Andrei Michailovich

Nonlinear- and quantum-optical processes in single-wall carbon nanotubes

Key words: carbon nanotube (CNT), kinetic equations, high-order harmonic generation, cubic nonlinearity, saturable absorption effect, Green tensor, thermal radiation.

The purpose of the thesis is the investigation of nonlinear optical effects peculiarities in nonchiral CNTs in a wide range of the irradiation field frequencies and intensities and establishment of the edge effects influence on the quantum optical processes in CNTs.

The kinetic equations describing behaviour of the CNT electron system exposed to the electric field of an arbitrary form polarised along the CNT axis are formulated. Methods of the numerical and analytical solution of the equations are elaborated. Effective high-order harmonic generation by the metallic CNT illuminated by the Gaussian pulse is predicted, the generation efficiency being decreasing with the pulse driving frequency increasing. The strong cubic nonlinearity inherent to metallic CNTs is predicted, the cubic polarisability magnitude of metallic CNTs being comparable with the cubic polarisability magnitude of semiconductor CNTs at the optical resonances frequencies. The saturable absorption effect in the CNT is investigated. High values of the CNT polarizability at resonance allow recommending CNT for making photonic switches and passive mode-lockers.

The method of the CNT electric field Green tensor calculation based on the solution of the boundary-value problem for Maxwell equations with two-side boundary impedance conditions has been elaborated. The boundary-value problem has been reduced to the integral Fredholm equation of first kind which has been solved numerically by the quadrature method. The resonance structure of the thermal radiation spectra of metallic CNTs due to the geometrical resonances of surface waves are predicted. The conception of the CNT based thermal antenna has been offered.

Немілендай Андрэй Міхайлавіч

Нелінейна- і квантава-аптычныя працэсы ў аднаслаёвых вугляродных нанатрубках

Ключавыя словы: вугляродная нанатрубка (ВНТ), кінэтычныя раўнанні, генерацыя вышэйшых гармонік, кубічная нелінейнасць, эффект насычэння паглынання, тэнзар Грына, цеплавое выпраменьванне

Мэта дысертацыйнай працы – выяўленне асаблівасцяў нелінейна-аптычных з’яў, якія меюць месца ў адвольных нехіральных ВНТ у шырокім дыяпазоне частот і інтэнсіўнасцяў апраменьвальнага поля; усталяванне ўплыву крайвых эфектаў на квантава-аптычныя працэсы, якія працякаюць ва ВНТ.

У дадзенай працы сфармуляваны кінэтычныя раўнанні, якія апісваюць паводзіны электроннай сістэмы ВНТ у электрычным полі адвольнай формы, палярызаваным уздоўж восі ВНТ. Распрацаваны метады лікавага і аналітычнага рашэння дадзеных раўнанняў. Прадказана эфектыўная генерацыя вышэйшых гармонік металічнай УНТ, апраменьванай гаўсавым імпульсам, прычым эфектыўнасць генерацыі памяншаецца з ростам апорнай частаты імпульсу. Прадказана моцная кубічная нелінейнасць металічных ВНТ, прычым значэнні кубічнай палярызаванасці металічных ВНТ на частотах аптычных рэзанансаў параўнальны па велічыні са значэннямі кубічнай палярызаванасці паўправадніковых ВНТ. Даследаваны эффект насычэння паглынання ва ВНТ. Вялікія рэзанансныя значэнні кубічнай палярызаванасці ВНТ дазваляюць рэкамендаваць УНТ для стварэння фатонных перамыкачоў і пасіўных засавак.

Распрацавана метадыка вылічэння тэнзара Грына электрамагнітнага поля для ВНТ, заснаваная на рашэнні краёвай задачы для раўнанняў Максвэла з двухбаковымі імпеданснымі межавымі ўмовамі. Краёвая задача зведзена да інтэгральных раўнанняў Фрэдгольма першага роду, якія вырашаны лікава метадам квадратур. Прадказаны рэзанансы ў спектрах цеплавога выпраменьвання металічных ВНТ, абумоўлены геаметрычнымі рэзанансамі павярхоўных хваль на баках ВНТ. Прапанавана канцэпцыя цеплавой антэны на аснове ВНТ.

НЕМИЛЕНЦЕВ
Андрей Михайлович

НЕЛИНЕЙНО- И КВАНТОВО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОДНОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

подписано к печати «27» марта 2009 г. Формат 60х90 1/16
Бумага – офисная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1.5.
Учет. изд. л. 1.0. Тираж 60 экз. Заказ № 76

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси,
220072, Минск, Беларусь, пр. Независимости, 68.
Отпечатано на ризографе Института физики им. Б.И. Степанова
НАН Беларуси
Лицензия ЛП № 20 от 27.05.2003 г.