

На правах рукописи



Александров Юрий Михайлович

**МОДЕЛЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
НАНОСТРУКТУР ПРИ УЧЁТЕ
АНИЗОТРОПИИ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ
ДИСПЕРСИИ**

Специальность 01.04.03 —
«Радиофизика»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Самара — 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Яцышен Валерий Васильевич

Официальные оппоненты: **Усанов Дмитрий Александрович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»,
Руденок Игорь Павлович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет»,

Ведущая организация: УФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Защита состоится 11 ноября 2016 г. в ... часов на заседании диссертационного совета Д219.003.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» по адресу: 443010, г. Самара, ул. Л.Толстого, д. 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Название библиотеки.

Автореферат разослан ... сентября 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д219.003.01, д-р физ.-мат. наук



Антипов Олег Игоревич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Предложенная тема диссертационного исследования обуславливается стремительным развитием интереса, как к оптике наноструктур, так и к современным тенденциям развития нанoeлектроники в целом со стороны технических наук. Несомненно, что радиофизика сегодня получает новое развитие и становится предметом глубоких исследований. Решение проблем радиофизики в современном обществе является одним из условий эволюционирования человечества в условиях стремительного научно-технического прогресса, связанного с развитием компьютерной техники, поиском новых материалов. Общие закономерности генерации высокочастотных колебаний и волн на поверхности различных сред, в том числе наноструктур, является современными областями исследований. Возможность их применения в прикладных исследованиях требует детального понимания фундаментальных принципов взаимодействия электромагнитного поля с веществом. Учитывая, что тремя основными физическими величинами присущими электромагнитному полю являются электрическая напряжённость электромагнитного поля \vec{E} , частота ω и волновой вектор \vec{k} , то за взаимодействие отвечает обобщённый тензор комплексной диэлектрической проницаемости $\hat{\epsilon}_{ij}(\omega, \vec{k})$, который зависит от частоты и волнового вектора и связывает поле в среде и вне неё. Очевидно, что полное понимание свойств отклика среды на внешнее воздействие требует учёта всех трёх величин. Большинство материалов являются анизотропными и в задачах электродинамики этим часто нельзя пренебрегать. Более того, учёт пространственной дисперсии делает любую среду анизотропной по отношению к внешнему электромагнитному полю. Современные тенденции к миниатюризации ставят перед наукой и техникой задачи поиска новых материалов в области наноразмеров, определения технологий такого поиска и описания на языке физических формул электродинамики наноструктур с учётом анизотропии электромагнитных свойств и временной и пространственной дисперсии.

Целью данной работы является решение задачи взаимодействия высокочастотного электромагнитного излучения с наноструктурами с учётом пространственной дисперсии, имеющей существенное значение для электроники и фотоники, как отраслей знаний.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Найти пути повышения качества расчёта зависимости диэлектрической проницаемости от частоты, волнового вектора электромагнитной волны для наноструктур (плёнки, нити, точки, фотонные кристаллы);
2. Развить теоретических положений по расчету, моделированию и проектированию устройств, работа которых основана на эффектах пространственной дисперсии.
3. Систематизировать способов исследований. Оценка их эффективности. Разработка рекомендаций по использованию предлагаемых способов исследований.
4. Разработать способы экспериментального исследования, а также методы расчета процессов, имеющих место при взаимодействии электромагнитного поля с наноструктурами на основе известных теоретических положений, новых методов расчета.

Научная новизна. Научная новизна диссертационного исследования заключается в том, что для расчёта диэлектрической проницаемости с учётом анизотропии и пространственной дисперсии получен метод, совмещающий в себе квантовый и классический подходы. Данный метод применён для наноструктур типа монослой (железа, титана), силицен, а также дефектные и бездефектные борные и боронитридные нанотрубки.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость заключается в том, что впервые проведён расчёт электромагнитных свойств наноструктур титана, оксида титана, силицена, бора, боронитрида с учётом анизотропии, а железа с учётом анизотропии и пространственной дисперсии. Результаты проведенного диссертационного исследования позволяют предполагать, что диэлектрическая проницаемость может быть успешно рассчитана с помощью методов квантовой механики и кристаллооптики с учётом пространственной дисперсии, вклад которой существенен в определённых случаях. Содержание и выводы диссертационного исследования могут быть использованы при проведении соответствующих экспериментов. При создании приборов наноэлектроники и фотоники с учётом более адекватных моделей может быть достигнуто лучшее управление существующей приборной базой

и получение дополнительного контроля над электромагнитным полем в среде благодаря использованию не только частотной зависимости, но зависимости от волнового вектора.

Методология и методы исследования. В диссертации использован метод теории функционала плотности, как современный высокоточный *ab initio* расчётный метод. В качестве источников исследования выступают труды отечественных и иностранных учёных, материалы дискуссий и научных статей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты последовательного учёта анизотропии для кристаллов железа, титана, оксида титана, а также монослоёв железа, титана, оксида титана, силицена, борных и боронитридных нанотрубок.
2. Метод определения тензора диэлектрической проницаемости.
3. Условия генерации поверхностного поляритона на границе с плёнкой титана с учётом рассчитанных в диссертации электродинамических параметров.
4. Зависимость диэлектрической проницаемости от волнового вектора для наноструктур.
5. Условия возбуждения поверхностных поляритонов с отрицательной групповой скоростью в слоистых металлических структурах.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных методов математической физики и физических теорий. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования изложены в научных статьях и тезисах, в выступлениях автора на научно-практических конференциях: 13th International Workshop on Nanoscience and Nanotechnology (Italy, Frascati, 2012), IV Всероссийской научно-технической конференции «Нанотехнологии и наноматериалы: современное состояние и перспективы развития» (Россия, Волгоград, 2014), XII Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Россия, Нижний Новгород, 2014), Всероссийской научной школы-семинара «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами,

метаматериалами и биообъектами» (Россия, Саратов, 2015), V Конференция с элементами научной школы для молодёжи «Органические и гибридные наноматериалы» (Россия, Иваново, 2015), XIII Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Россия, Казань, 2015).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 13 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 8 — в тезисах докладов. Кроме того получено 2 свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Содержание работы

Во **введении** дана оценка актуальности работы, приведены определения объекта и предмета исследования, а также краткая история его развития. Сформулирована научная новизна работы, цель и основные направления исследования, перечислены новые результаты и положения выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертационной работы приведен обзор современного состояния проблемы. Значительное место уделено рассмотрению существующих методов расчета оптических свойств наноструктур, позволяющих учесть различные факторы, влияющие на проявления эффектов пространственной дисперсии.

Определены области применимость макротeorии к описанию оптических свойств наноструктур, изложены основные методы квантовой химии, а также метод Кубо-Гринвуда для расчёта мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости. Излагается метод расчёта тензора комплексной диэлектрической проницаемости с использованием волновых функций получаемых «из первых принципов» пакетом SIESTA.

В подходе Аграновича, Гинзбурга, искомый тензор представляется формулой [1]:

$$\varepsilon_{ij}^{(n)}(\omega, \vec{k}) = \left(1 - \frac{4\pi}{\omega^2 V} \sum_{\alpha} \frac{e^2}{m_{\alpha}} \right) \delta_{ij} - \frac{4\pi c^2}{h\omega^2 V} \sum_{m \neq n} \left[\frac{M_{nm}^i(-\vec{k}) M_{mn}^j(\vec{k})}{\omega - \omega_m + \omega_n} - \frac{M_{mn}^i(-\vec{k}) M_{nm}^j(\vec{k})}{\omega + \omega_m - \omega_n} \right]. \quad (1)$$

Данная формула не учитывает релаксацию, взаимодействующих с электромагнитным полем свободных носителей заряда (квазичастиц) и основана на расчёте матричных элементов дипольных переходов при взаимодействии квантовой системы с электромагнитным излучением. Использовался полуклассический подход, т.е. излучение рассматривалось как плоская волна, а вещество как квантовая система. Потребовалось найти набор волновых функций для данной квантовой системы и набор собственных значений. Формула (1) предполагает наличие информации о базисе собственных волновых функций и собственных энергиях гамильтониана рассчитываемых структур.

Для определения матричных элементов $M_{mn}^j(\vec{k})$ необходимо знать вид волновых функций. Для их получения взята программа SIESTA, которая использует метод МО ЛКАО. В качестве радиальной части базисных функций выбираются НАО (numerical atomic orbitals), которые представляют собой численное решение уравнения Кона-Шэма для изолированного псевдоатома с теми же приближениями (обменный функционал, псевдопотенциал), что и для конденсированной системы.

$$\left(-\frac{1}{2r} \frac{d^2}{dr^2} r + \frac{l(l+1)}{2r^2} + V_l(r) \right) R_l(r) = E_l R_l(r).$$

Решение данного уравнения производится методом Нумерова. Базисная функция представляется в виде:

$$\phi_{lmn}(\vec{r}) = R_{ln}(|\vec{r}_I|) Y_{lm}(\hat{r}_I).$$

Интересно то, что базисные функции строятся для изолированных атомов, а используются в конденсированном веществе. Это делается для большей гибкости при описании различных систем.

Таким образом,

$$\Psi_\mu = \sum_\nu C_{\mu\nu} R_\nu(r) Y_\nu(\theta, \varphi). \quad (2)$$

Далее переобозначим $\Psi_{n0} \equiv \Psi_\mu$ — полная функция состояния системы.

Для расчёта тензора диэлектрической проницаемости нужно знать компоненты матричных элементов, которые находятся, исходя из того, что:

$$M_{nm}(\vec{k}) = \langle \Psi_{n0} | \hat{M}(\vec{k}) | \Psi_{m0} \rangle = \int_V \Psi_{n0}^* \hat{M}(\vec{k}) \Psi_{m0} dV, \quad (3)$$

$$\hat{M}(\vec{k}) = - \sum_\alpha \frac{e_\alpha}{2m_\alpha c} \left(\hat{p}_\alpha e^{i\vec{k}\vec{r}} + e^{i\vec{k}\vec{r}} \hat{p}_\alpha \right), \quad (4)$$

$$\hat{p}_\alpha = -i\hbar \frac{\partial}{\partial \vec{r}_\alpha} = -i\hbar \left(\frac{\partial}{\partial r_\alpha} + \frac{1}{r_\alpha} \frac{1}{\partial \theta_\alpha} + \frac{1}{r_\alpha \sin \theta_\alpha} \frac{\partial}{\partial \phi_\alpha} \right). \quad (5)$$

Подставляем (5) в (4) и результат в выражение для матричного элемента (3):

$$M_{nm}(\vec{k}) = \int_V \Psi_{n0}^* \left[-\frac{Ne}{2mc} \left(-i\hbar \frac{\partial}{\partial \vec{r}} \left(e^{i\vec{k}\vec{r}} \Psi_{m0} \right) + e^{i\vec{k}\vec{r}} \left(-i\hbar \frac{\partial \Psi_{m0}}{\partial \vec{r}} \right) \right) \right] dV. \quad (6)$$

Получив матричные элементы, можно рассчитать компоненты тензора диэлектрической проницаемости.

Вторая глава посвящена численному исследованию анизотропии наноструктур титана, оксида титана, дефектных и бездефектных борных и борнитридных нанотрубок, силицена.

Из первых принципов произведены расчёты действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости объёмной фазы и слоёв титана. Симуляция взаимодействия света с веществом осуществлялась с помощью программы SIESTA. Определена анизотропия оптических свойств объёмной фазы и монослоя титана, что является нетрадиционной задачей.

Известно, что титан имеет гексагональную плотноупакованную решётку. Компоненты тензора имеют два главных значения — в направлении параллельном оси Oz и перпендикулярном к нему.

Из первых принципов произведены расчёты действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости борных нанотрубок. Си-

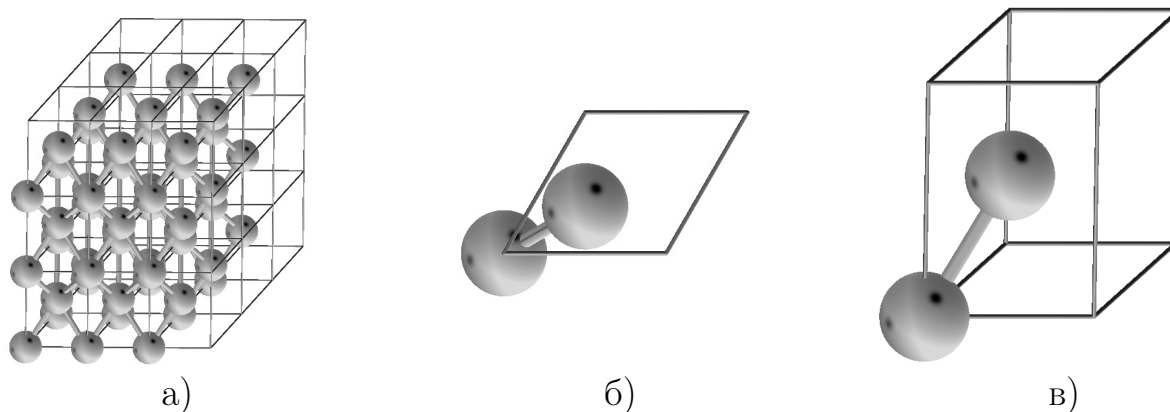


Рис. 1 — Элементарная структура альфа-титана: а) решётка $3 \times 3 \times 3$; б) вид сверху на элементарную ячейку; в) элементарная ячейка.

Мультипликация взаимодействия света с веществом осуществлялась с помощью программы SIESTA. Установлено, что борные трубки обладают оптической анизотропией.

Это отличает их от борнитридных нанотрубок, которые имеют три разные диагональные компоненты тензора диэлектрической проницаемости.



Рис. 2 — Элементарная структура борной трубки (5;0): а) вид сбоку; б) вид сверху

Третья глава посвящена численному исследованию анизотропии и пространственной дисперсии в конкретных наноструктурах (плёнки титана и железа, силицена)

Формула (1) получена для кристаллов. Для случая наноструктур, её следует преобразовать. Для тонких плёнок отсутствует трансляция волновой функции электрона вдоль оси аппликата:

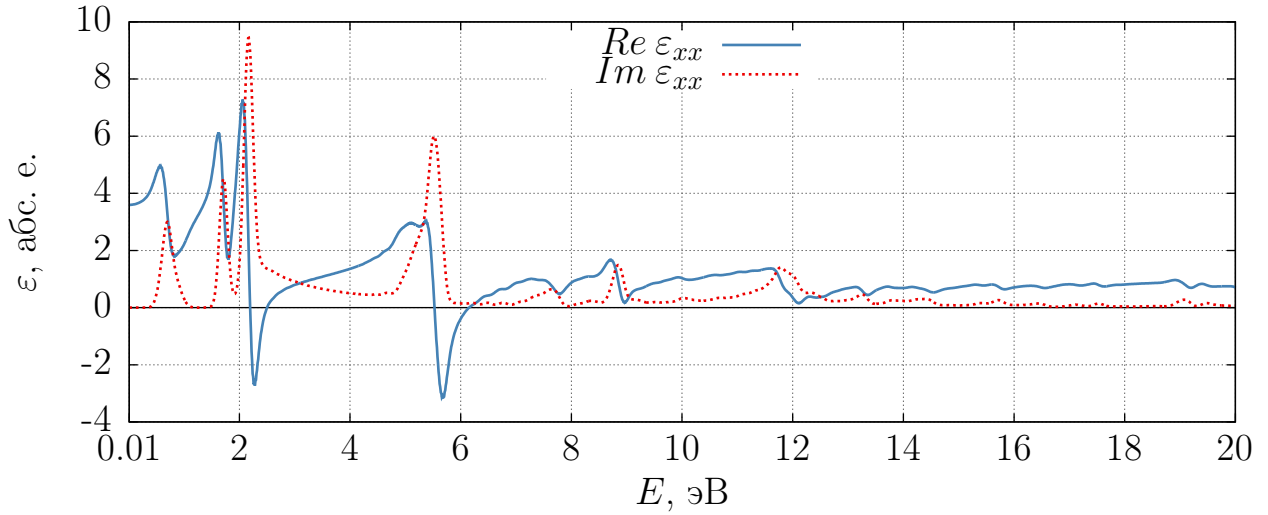


Рис. 3 — Зависимость действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости от энергии излучения для компоненты ε_{xx} борной нанотрубки.

$$\hat{M}_j(\vec{k}_x, \vec{k}_y) = -\frac{Ne}{2mc} \left(\hat{p}_j e^{i(k_x x + k_y y)} + e^{i(k_x x + k_y y)} \hat{p}_j \right), \quad j = \{x, y\}. \quad (7)$$

Для нитей отсутствует трансляция сразу по двум пространственным направлениям:

$$\hat{M}_x(\vec{k}_x) = -\frac{Ne}{2mc} \left(\hat{p}_x e^{ik_x x} + e^{ik_x x} \hat{p}_x \right). \quad (8)$$

Квантовые точки являются нульмерными объектами, поэтому явление пространственной дисперсии для них отсутствует по определению.

На Рис. 4 представлена модельная структура монослоя железа.

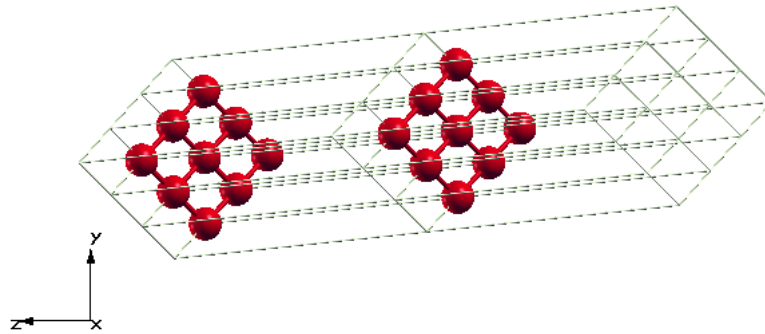


Рис. 4 — Элементарная структура плёнки железа.

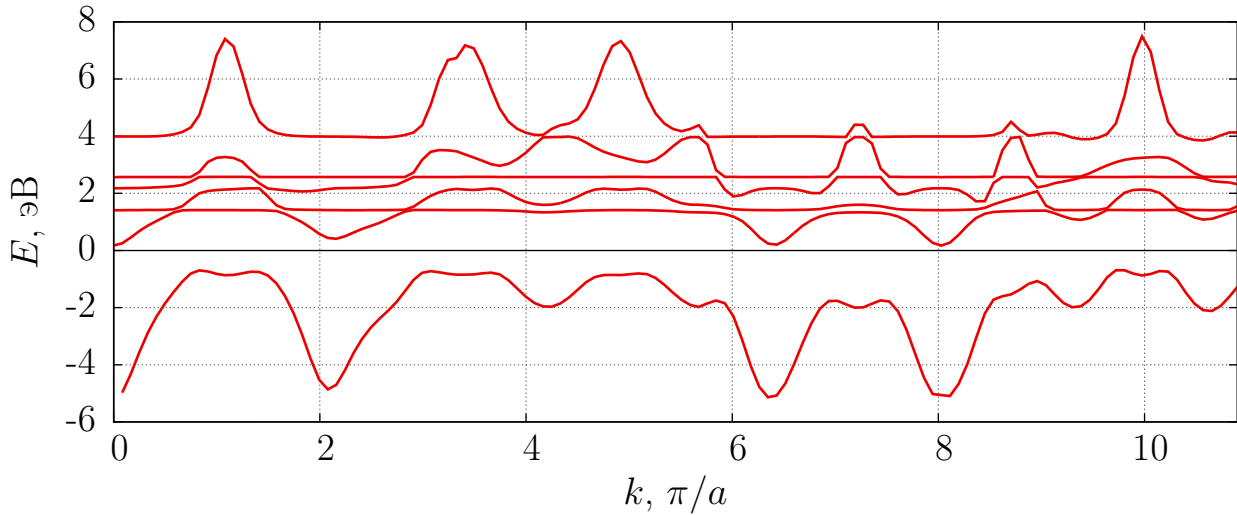


Рис. 5 — Зонная структура монослоя железа (получена программным пакетом SIESTA), волновой вектор указан в единицах π/a , где a — параметр решетки. Показаны только уровни с энергиями в диапазоне $[-20.0; 20,0]$ эВ.

Интересно то, что, исходя из рис. 5, монослой железа является нестабильным полупроводником.

На Рис. 6а показана частотная зависимость, а на Рис. 6б зависимость диэлектрической проницаемости от волнового вектора для данного монослоя железа.

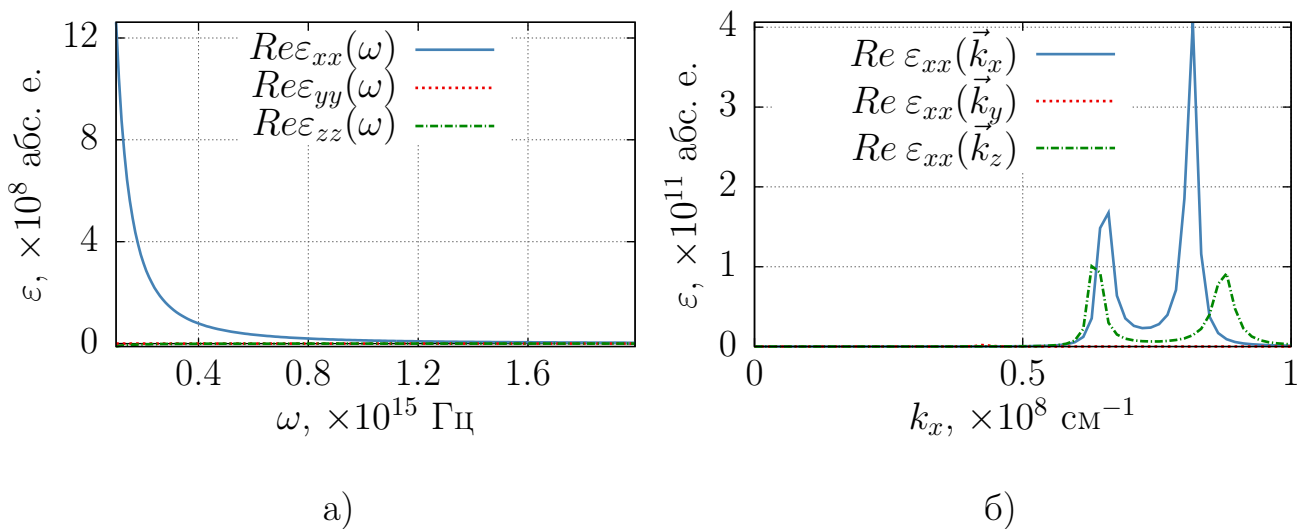


Рис. 6 — а) Зависимость диагональных компонент действительной части тензора диэлектрической проницаемости от частоты. б) Зависимость диагональных компонент действительной части диэлектрической проницаемости от волнового вектора.

На Рис. 6б видны два пика, что сильно отличает поведение диэлектрической проницаемости монослоя от кристалла железа (Рис. ??) в пространстве волновых векторов и указывает на сильную пространственную дисперсию в диапазоне $[0.5e+08; 1.0e+08]$ см^{-1} , что соответствует диапазону длин волн $[6.28e-08; 12.6e-08]$ см (мягкое рентгеновское излучение).

Четвёртая глава посвящена процессам с участием поверхностных поляритонов.

Для выяснения особенностей частотной зависимости энергетических коэффициентов отражения и прохождения нами были проведены многочисленные расчеты этих величин для геометрии, изображенной на Рис. ??.

Мы выбирали диэлектрическую проницаемость среды I достаточно большой для реализации режима нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) $\epsilon = 20.00$, толщина слоя воздуха равна $d_0 = 3.25\mu$, среда III – титан.

Нами был проведен более тщательный анализ возбуждения поверхностного поляритона вблизи частоты $h\nu = 0,261\text{eV}$ ($\lambda = 4,75\mu$), отвечающей пику на Рис. 7. Для этого был рассчитан угловой спектр отражения.

На Рис. 7 изображен угловой спектр энергетических коэффициентов отражения и прохождения при изменении угла падения от 0° до 15° . Все остальные параметры такие же, как и при расчете частотных спектров.

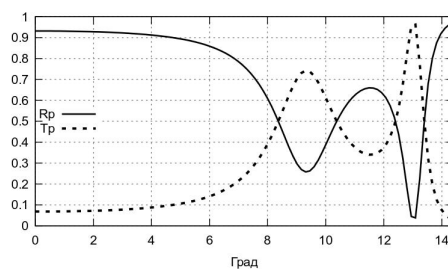
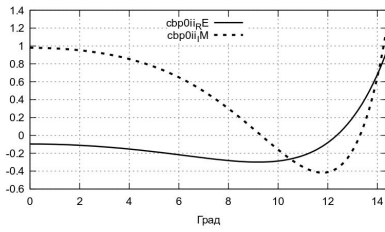


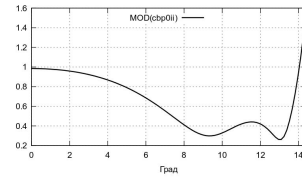
Рис. 7 — Угловая зависимость энергетических коэффициентов отражения R_p прохождения T_p для геометрии отражения, показанной на Рис. ??.

Виден пик на угле $\alpha = 13,05^\circ$. Именно при таком угле падения в геометрии Рис. ?? возбуждается поверхностный поляритон. Для демонстрации этого нами был проведен расчет величины знаменателя $\text{сbr}0ii$ комплексного ко-

ээффициента отражения R_p для р-поляризации, а также модуля $\text{MOD}(cbr0ii)$ этого знаменателя. На рис. 8а и рис. 8б изображены эти величины.



а)



б)

Рис. 8 — Угловая зависимость: а) действительной и мнимой частей знаменателя $cbr0ii$ комплексного коэффициента отражения гр для р-поляризации в геометрии отражения, показанной на Рис. ??; б) модуля $\text{MOD}(cbr0ii)$ знаменателя $cbr0ii$ комплексного коэффициента отражения R_p для р-поляризации в геометрии отражения, показанной на Рис. ??.

Из этих рисунков видно, что пики на угловом спектре отвечают минимальным значениям модуля знаменателя коэффициента отражения. При отсутствии мнимой части диэлектрической проницаемости знаменатель обращается в нуль и это отвечает возбуждению поверхностного поляритона. Но такой случай (обычно рассматриваемый при анализе поверхностных волн на границе) является идеализацией и не соответствует действительности, потому что действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости должны удовлетворять соотношению Крамерса-Кронига. В нашем расчете диэлектрической проницаемости Ti это соотношение положено в основу.

В **заклЮчении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем: Разработан метод расчёта обобщённого тензора комплексной диэлектрической проницаемости с учётом пространственной и временной дисперсии. Метод реализован в виде компьютерной программы на языке Фортран 95.

В работе приведено более адекватное описание электродинамики наноструктур. Именно электромагнитные свойства наноструктур играют определяющую роль при создании элементов нанoeлектроники и фотоники.

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Обнаруженный эффект влияния анизотропии при рассмотрении диэлектрической проницаемости наноструктур (плёнки титана и железа, силицена, борные и боронитридные нанотрубки) позволяет более адекватно описать электродинамику этих материалов. Именно электромагнитные свойства наноматериалов играют определяющую роль при создании элементов наноэлектроники.
2. Учёт пространственной дисперсии может позволить более гибко управлять поведением электромагнитной волны в веществе, а также создать устройства на основе эффектов зависимости диэлектрической проницаемости не только от частоты (частотная дисперсия), но и от волнового вектора.
3. Микротеория и подход «из первых принципов» позволяет теоретически предсказывать оптические свойства наноструктур для создания наноматериалов с заданными свойствами.

Помимо этого:

1. проведён расчёт диагональных компонентов тензора диэлектрической проницаемости для борных, боронитридных нанотрубок (идеальных и с дефектами замещения). Полученные зависимости говорят о существенном влиянии размерного эффекта на оптические свойства наноструктур, указывают на изменение симметрии тензора диэлектрической проницаемости среды при переходе в наноразмерное состояние. Полученные результаты опубликованы в работах [2–8];
2. получены зависимости диэлектрической проницаемости от частоты и волнового вектора. Характер зависимости в определённых диапазонах волновых векторов существенно нелинейный. Учёт пространственной дисперсии позволяет значительно более точно описывать электродинамику наноструктур. Использование зависимости может позволить более гибко управлять электромагнитным полем внутри структуры путём соответствующей настройки внешнего источника. Результаты опубликованы в работах [9; 10];
3. рассчитаны условия существования поверхностной электромагнитной волны (поверхностного поляритона) на поверхности титана. Особенностью расчёта является использование квантовой механики

для получения частотной зависимости частей комплексной диэлектрической проницаемости. Важно то, что была выбрана именно зависимость для титана, т.к. в ней были обнаружены отрицательные области в действительной части диэлектрической проницаемости, что является первым необходимым условием существования поверхностного поляритона. Результаты опубликованы в работе [11].

Получены 2 свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ [12; 13].

Публикации автора по теме диссертации

1. *Aleksandrov Y. M., Yatsishen V. V.* Calculation of permittivity imaginary part for Titanium Oxide Nanoparticles // 13th International Workshop on Nanoscience and Nanotechnology. — INFN – Frascati National Laboratories Frascati. Italy : Nanoscience, Nanotechnology, Oct. 2012.
2. *Александров Ю., Яцышен В.* АВ INITIO расчет мнимой части комплексной электрической проницаемости наночастиц оксида титана // Вестник ВолГУ. — 2012. — № 6. — С. 21–23. — (10-я сер.)
3. *Александров Ю., Яцышен В.* Расчёт элементов тензора комплексной диэлектрической проницаемости для анизотропных материалов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2015. — Т. 18, № 1. — С. 23–27.
4. *Александров Ю., Яцышен В.* Диэлектрическая проницаемость борных нанотрубок с дефектами замещения // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2015. — Т. 18, № 2. — С. 25–26.
5. *Александров Ю., Яцышен В.* Анизотропные свойства наноразмерного титана — расчёт тензора комплексной диэлектрической проницаемости // Приоритетные технологии: актуальные вопросы теории и практики. — 2014. — С. 147–151.
6. *Александров Ю., Яцышен В.* Расчёт оптических свойств боронитридных нанотрубок // Приоритетные технологии: актуальные вопросы теории и практики. — 2014. — С. 152–153.
7. *Александров Ю., Яцышен В.* Анизотропные свойства объёмного и наноразмерного оксида титана – расчёт тензора комплексной диэлектрической проницаемости // XII Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов». — 2014.
8. *Александров Ю., Яцышен В.* Расчёт оптических свойств борных нанотрубок // XII Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов». — 2014.

9. *Александров Ю., Яцышен В.* Диэлектрическая проницаемость боронитридных нанотрубок с дефектом замещения // Взаимодействие сверхвысокочастотного терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. — 2015. — С. 31—32.
10. *Александров Ю., Яцышен В.* Зависимость действительной части комплексной диэлектрической проницаемости от волнового вектора для кремния // Органические и гибридные наноматериалы: Пятая конференция с элементами научной школы для молодёжи. — 2015. — С. 79—81.
11. *Александров Ю., Калита Т., Яцышен В.* Комплексная диэлектрическая проницаемость нанослоёв титана // XIII Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов». — 2015. — С. 165—167.
12. *Александров Ю., Яцышен В.* Поверхностные поляритоны на границе объёмный титан — вакуум // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2013. — Т. 16, № 4. — С. 23—26.
13. *Александров Ю., Яцышен В.* Поверхностные поляритоны с отрицательной групповой скоростью в структуре с переходным слоем // Журнал нано- и электронной физики. — 2016. — Т. 8, № 1. — 01013(3).