

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена исследованию собственных электромагнитных полей, частот и порогов излучения в одиночных и связанных двумерных диэлектрических резонаторах с активными зонами с помощью граничных задач для линейных уравнений Максвелла для монохроматических волн.

Актуальность темы. Развитие устройств и систем, использующих электромагнитные волны для передачи и обработки информации, привело к тому, что в настоящее время существует острая потребность в компактных источниках коротких электромагнитных волн (от терагерцевых до ультрафиолетовых). Среди таких источников центральное место занимают монокристаллические, полупроводниковые и полимерные микрорезонаторы, нередко в форме тонких дисков, содержащие активные зоны. Накачка активных зон осуществляется либо фотоспособом, либо инъекцией носителей с электродов. В частности, именно такие устройства сейчас рассматриваются как наиболее перспективные источники терагерцевых волн, а также источники одиночных фотонов для квантовых компьютеров будущего. Изготовление подобных активных резонаторов или лазеров связано с дорогостоящими технологиями, а измерение их характеристик требует сложной аппаратуры, в частности, спектрометров с рекордно высоким разрешением. На сегодняшний день в мире есть только несколько лабораторий (Калифорнийский технологический институт, Национальный университет Йогоама, Лаборатория фотоники и наноструктур CNRS в г. Маркуси (Франция), Технический университет Цюриха, Институт полупроводников Китайской академии наук в Пекине), в которых изготавливают такие источники волн и проводят их экспериментальные исследования. В силу сказанного выше, предварительное моделирование подобных устройств и теоретическое описание физических эффектов в них являются критически важными элементами соответствующих исследований.

Вместе с тем, подходы и методы моделирования диэлектрических резонаторов с активными зонами до недавнего времени исчерпывались анализом полей и поиском комплексных собственных частот собственных мод в *пассивных* резонаторах. При этом наиболее часто применялись два метода: геометрической оптики (ГО), известной также как теория бильярда, и численный метод конечных разностей во временной области (МКРВО). Несмотря на свою полезность, каждый из них имеет неустранимые недостатки. ГО неприменима для резонаторов, размеры которых сравнимы с длиной волны, и неспособна рассчитать потери на излучение и добротности мод. Даже более того, ГО неспособна воспроизвести дискретность спектра мод открытого резонатора. МКРВО, в свою очередь, непригоден для прямого исследования собственных мод. В его рамках в резонатор помещают пульсирующий точечный источник, рассчитывают переменное поле в некоторой точке, применяют преобразование Фурье и восстанавливают добротности по резонансным пикам. Все это связано с разнообразными погрешностями и не обеспечивает желаемой точности моделирования.

Однако наиболее фундаментальным недостатком указанного подхода является то, что в модели пассивного резонатора существование активной зоны полностью игнорируется. Тем самым отсутствует какая-либо возможность описания такого важнейшего свойства активного резонатора как наличие порога излучения и объяснения того известного факта, что нередко излучение происходит на модах, не обладающих наибольшей добротностью при отсутствии накачки. Попытки построения моделей, способных описывать пороги, были связаны с квантово-механическими нелинейными моделями и не опирались на «первые принципы», которыми в данном случае являются уравнения Максвелла с точными граничными условиями на поверхности резонатора и условием излучения. Поэтому тема исследования современна и актуальна.

Связь с научными программами, планами, темами. Диссертация выполнялась в рамках

1. Госбюджетных научно-исследовательских работ ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины: “Теоретичне та експериментальне дослідження хвильових процесів у приборах та пристроях мікрохвильового і міліметрового діапазонів довжин хвиль” (шифр «Буксир-2», номер госрегистрации 01.00U006441, 2002–2006, исполнитель) и «Розробка та впровадження нових методів обчислювальної радіофізики, теоретичне та експериментальне дослідження трансформації електромагнітних полів гіга- і терагерцового діапазонів в об’єктах і середовищах антропогенного та природного походження» (шифр «Буксир-3», номер госрегистрации 01.06U011975, 2007-2010, исполнитель).
2. Конкурсной целевой программы НАН Украины „Наноструктурні системи, наноматеріали, нанотехнології”: «Мікро та нанорозмірне електродинамічне моделювання оптичних полів у резонаторах з активними зонами з квантових шарів, дрітків та точок» (шифр «Поріг», номер госрегистрации 01.07U003983, 2007–2009, ответственный исполнитель).
3. Конкурсной научной темы Министерства образования и науки Украины «Інноваційне чисельне моделювання квазіоптичних фокусуєчих систем» (шифр «Фокус», номер госрегистрации 01.09U005351, 2009-2010, исполнитель).
4. Программы научного обмена НАН Украины с Королевским научным обществом, Великобритания, совместно с Университетом г. Ноттингем (конкурсные проекты «Modelling of micro and nano-scale resonators and lenses for dense photonic circuits», 2004-2007 и «Advanced modelling of single and periodic active dielectric resonators for microlasers», 2007-2009).
5. Программы научного обмена НАН Украины с Госкомитетом по научным и техническим исследованиям Турции, совместно с Университетом Билькент, Анкара (конкурсные проекты "Processing of light with micro-scale to nano-scale mirrors and lenses for the emerging optoelectronic applications," #103E037, 2004-2006 и «Innovative electromagnetic modeling

of multielement quasioptical focusing systems for sub-mm and terahertz ranges», #106E209, 2007-2009).

6. Программы научного обмена НАН Украины с Академией наук Чешской республики, совместно с Институтом фотоники и электроники АНЧР, Прага (конкурсный проект «Electromagnetic and numerical modelling of active and nonlinear microcavities for semiconductor lasers and all-optical switches», 2008-2009).

Работа также была частично связана с выполнением следующих международных конкурсных научных проектов:

- «Eigenvalue problems for cyclic photonic-molecule microcavity lasers», Международное научное общество IEEE Electron Devices Society, 2005;
- «Quasi-3D electromagnetic modeling of microcavity lasers and laser arrays with lowered thresholds and improved directionalities», Ассоциация INTAS, Европейский Союз, совместно с Университетом г. Ноттингем, 2005-2007;
- «Advanced linear modelling of semiconductor microcavity lasers», Международный Вышеградский фонд, Европейский Союз, совместно с Институтом фотоники и электроники АНЧР, Прага, 2007-2008;
- «Electromagnetic modeling and design of dielectric lenses and resonators for the emerging photonic and THz applications», Министерство иностранных и европейских дел, Франция, совместно с Университетом Рен 1, 2008-2009.

Цель и задачи исследования. Целью исследования в диссертации являлось построение линейной модели для собственных электромагнитных полей в одиночных и связанных двумерных диэлектрических резонаторах с активными зонами, разработка на ее основе алгоритмов численного анализа и расчет спектров частот и порогов излучения, а также выработка рекомендаций для понижения порогов и улучшения направленности излучения. Для достижения этих целей были рассмотрены следующие задачи:

- Постановка математической модели, адекватно описывающей собственные электромагнитные поля (моды) в открытых резонаторах с активными зонами.

- Разработка численных алгоритмов для расчета спектров частот и порогов излучения мод, а также их полей в ближней и дальней зонах.
- Расчет частот, порогов излучения и полей для мод:
 - одиночного кругового резонатора, в том числе полностью активного и с частичной (радиально неоднородной) активной зоной;
 - активного диска в пассивном кольце и кольцевом рефлекторе Брэгга;
 - циклических фотонных молекул из активных круговых резонаторов;
 - активного одиночного резонатора со спиральным контуром.

Объектом исследования в диссертации является явление излучения монохроматических электромагнитных волн одиночными и связанными двумерными диэлектрическими резонаторами с активными зонами.

Предметом исследования являются собственные электромагнитные поля в двумерных моделях одиночных и связанных диэлектрических резонаторов с активными зонами, спектры собственных частот и материальные пороги излучения.

Методы исследования. В диссертационной работе использовались методы теории граничных задачах электродинамики, в соответствии с которыми собственные моды являются решениями однородных уравнений Максвелла для полей, гармонически зависящих от времени, с точными граничными условиями и условием излучения на бесконечности. Размерность этих задач была понижена до двух измерений с помощью широко известного приближенного метода эффективного показателя преломления. Полученные двумерные задачи, для каждого из рассмотренных диэлектрических резонаторов, были сведены эквивалентным образом к однородным матричным уравнениям Фредгольма 2-го рода. Для одиночных и многослойных круговых резонаторов, а также фотонных молекул из них, это достигается с помощью метода полного или частичного разделения переменных. Для резонатора с произвольным гладким контуром к той же цели приводит метод граничных интегральных уравнений Мюллера, дискретизация которых проводилась методом квадратур. Собственные значения как нули соответствующего

детерминантного уравнения находились численно с контролируемой точностью с помощью двухпараметрического метода Ньютона.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- задача о нахождении собственных мод открытых диэлектрических резонаторов впервые сформулирована таким образом, что позволяет учесть наличие активной зоны в резонаторе и, на основе этого, найти спектры и пороги излучения мод;
- впервые установлена, на основании уравнений Максвелла, связь порога излучения моды с ее добротностью и степенью перекрытия активной зоны с электрическим полем моды;
- установлено, что в тонком одиночном микродиске есть низшие моды с высокими порогами излучения и моды шепчущей галереи с экспоненциально низкими порогами;
- впервые показано, что, объединяя микродиски в циклические фотонные молекулы, можно добиться снижения порогов излучения супермод (связанных мод), построенных как на низших модах, так и на модах шепчущей галереи;
- впервые обнаружено, что в структуре активный диск + пассивный кольцевой отражатель порог излучения супермоды могут быть как ниже, так и выше, чем в одиночном диске. Это зависит от степени перекрытия поля с активной зоной. Порог резко возрастает при втягивании поля в пассивные области резонатора;
- продемонстрировано, что деформация микродиска в спиральный резонатор приводит к расщеплению мод на дублеты. При этом направленность излучения мод шепчущей галереи улучшается, однако пороги излучения возрастают. Главным фактором является волновая высота ступеньки на контуре.

Практическая значимость полученных результатов. Предложенный в данной работе подход и разработанные численные алгоритмы можно использовать для электродинамического анализа излучающихся мод лазерных

микрорезонаторов в виде тонких активных дисковых резонаторов, фотонных молекул из них, дисков внутри кольцевых рефлекторов Брэгга, а также активных двумерных резонаторов с произвольным гладким контуром, в диапазоне от терагерцевых волн до ультрафиолета. Установленные закономерности поведения мод в таких резонаторах значительно углубляют понимание поведения порогов излучения. Они указывают возможные пути понижения порогов и улучшения направленности излучения. Высокая эффективность разработанных алгоритмов позволяет использовать их для компьютерного проектирования и численной оптимизации источников волн с желаемыми характеристиками. В настоящее время имеются реальные перспективы проверки ряда предсказанных эффектов в Лаборатории квантовой и молекулярной оптики Технического университета г. Кашан (Ecole Normale Supérieure de Cachan), Франция, где проводятся экспериментальные исследования одиночных и связанных полимерных микрорезонаторных лазеров.

Личный вклад диссертанта. Основные результаты, приведенные в диссертации, принадлежат автору. В написанных в соавторстве работах [1-7,9-45] этот вклад состоит в выводе основных уравнений, разработке компьютерных алгоритмов, систематических расчетах частот и порогов, а также в интерпретации полученных численных результатов; в обзорной статье [8] он состоит в расчете примеров, иллюстрирующих свойства порогов излучения мод в круговых резонаторах и фотонных молекулах.

Апробация результатов диссертации. Результаты работы обсуждались и докладывались на следующих научных семинарах: отдела вычислительной электродинамики ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины (рук. проф. А.А. Кириленко), кафедры высшей математики Харьковского национального университета радиоэлектроники «Интегральные уравнения электродинамики» (рук. проф. А.Г. Нерух), департамента электротехники и электроники Университета Билькент, Анкара (рук. проф. А. Алтынташ), Института исследований по электромагнитной теории им. Дж. Грина, Университет г. Ноттингем (рук. проф. Т.М. Бенсон), лаборатории оптоэлектроники

Университета Астон, г. Бирмингем, Института фотоники и электроники Академии наук Чешской Республики, Прага (рук. проф. И. Чтыроки), а также на следующих международных научных конференциях и симпозиумах:

- «Дни дифракции», Санкт-Петербург (2004, 2007)
- Physics and Engineering of Microwaves, Mm and Sub-mm Waves, Харьков, (2004, премия за лучший стендовый доклад для молодых ученых)
- Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Днепропетровск (2004)
- Antennas and Electromagnetics, Сан Мало, Франция (2005)
- Microwave and Optical Technologies, Фукуока, Япония (2005)
- Advanced Optoelectronics and Lasers, Алушта (2003,2008), Ялта (2005)
- Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, Берлин (2005)
- Workshop on Electromagnetic Wave Scattering, Гебзе, Турция (2006)
- Mediterranean Microwave Symposium, Будапешт (2007)
- Наносистеми, наноструктури і нанотехнології, Киев (2007)
- Open Waveguide Theory and Numerical Modeling, Прага (2003), Гренобль (2005), Варезе (2006), Копенгаген (2007), Эйндховен (2008)
- Transparent Optical Networks, Варшава (2003), Вроцлав (2004), Барселона (2005), Ноттингем (2006), Рим (2007), Афины (2008), Понта Дельгада (2009)
- Waves in Science and Engineering, Мехико-Сити (2009))
- IX Харьковская конференция молодых ученых, Харьков (2009)

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 46 научных работах, в том числе 8 статьях в научных журналах [1-8] и 38 работах в сборниках трудов международных конференций [9-46].