

**I. РЕЗУЛЬТАТЫ,
ПРЕДСТАВЛЯЕМЫЕ
В ДОКЛАД ПРЕЗИДЕНТА РАН**

1. В экспериментах по генерации ультрарелятивистских электронов плазменной волной, возбуждаемой при фокусировке мощного фемтосекундного лазерного импульса в струю гелия, получено ускоряющее напряжение 1 ГВ/см. Заряд электронов в пучке составил 10 пК, энергия электронов 200 МэВ, ширина энергетического спектра 10%, угловая расходимость пучка 2.5 миллирадиана. Достигнутые параметры близки к лучшим мировым результатам.

Авторы: В. Н. Гинзбург, В. В. Зеленогорский, Е. В. Катин, А. В. Кирсанов, В. В. Ложкарев, Г. А. Лучинин, А. Н. Мальшаков, М. А. Мартьянов, О. В. Палашов, А. К. Потемкин, А. М. Сергеев, А. А. Соловьев, М. В. Стародубцев, Е. А. Хазанов, А. А. Шайкин, И. В. Яковлев.

2. Разработан и успешно испытан опытный образец промышленной установки для высокоскоростного выращивания поликристаллических алмазных пленок и пластин большой площади (более 100 см²). В созданной установке за счет поддержания плазмы высокой плотности излучением гиротрона на частоте 28 ГГц скорость роста алмазных пленок высокого качества достигает не менее 10 мкм/час, что значительно превосходит скорость роста в существующих СВЧ реакторах, в которых плазма поддерживается излучением на частотах 915 МГц и 2,45 ГГц.

Авторы: Быков Ю.В., Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Горбатушков В.Н., Денисов Г.Г., Еремеев А.Г., Калынова Г.И., Козлов А.В., Копелович Е.А., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Корчагин В.В., Литвак А.Г., Мучников А.Б., Овечкин Н.М., Плотников И.В., Радищев Д.Б., Троицкий М.М., Флат Ф.А., Холопцев В.В. (ИПФ РАН, ЗАО НПП «ГИКОМ»)

3. Реализованы две разновидности мощных импульсных терагерцовых гиротронов с рекордными параметрами:

- традиционный генератор с магнитным полем до 50 Тл, работающий на основном циклотронном резонансе и обеспечивающий в разовых импульсах длительностью 30-40 мкс генерацию на частотах 1 и 1,3 ТГц мощностью 5 и 0,5 кВт соответственно;

- гиротрон с приосевым электронным пучком с магнитным полем до 14 Тл, работающий на второй и третьей циклотронных гармониках и обеспечивающий генерацию на четырех частотах в диапазоне 0,5-1,0 ТГц в импульсах длительностью 10 мкс мощностью 0,3-1,8 кВт.

Авторы: В.Л. Братман, М.Ю.Глявин, А.Г. Лучинин, Ю.К. Калынов, В.Н. Мануилов

4. Разработан источник экстремального ультрафиолетового излучения на основе разряда низкого давления, поддерживаемого мощным электромагнитным излучением миллиметрового диапазона длин волн в условиях электронно-циклотронного резонанса в парах олова, инжектируемых в магнитную ловушку из вакуумно-дугового разряда. В экспериментах мощность линейчатого излучения многозарядных ионов олова с длиной волны 13,5 нм в полосе $\pm 1\%$ достигала 50 Вт. К.п.д. преобразования поглощенного в плазме СВЧ излучения в экстремальный ультрафиолет достигает 1%, что сравнимо с лучшими мировыми достижениями.

Авторы: А.В. Водопьянов, С.В. Голубев, Д.А. Мансфельд (ИПФ РАН); А.Г. Николаев, К.П. Савкин, Г.Ю. Юшков (ИСЭ СО РАН, Томск); Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало (ИФМ РАН, Нижний Новгород).

5. Впервые осуществлена фазовая стабилизация частоты излучения источника миллиметрового/субмиллиметрового диапазона по эквидистантным компонентам широкополосного спектра, получаемого с помощью фемтосекундного лазера. Оптико-терагерцовое преобразование последовательности лазерных импульсов и ее смещение с миллиметровым/субмиллиметровым излучением осуществлено на диоде Шоттки. Продемонстрирована возможность создания принципиально нового поколения синтезаторов частоты, с субгерцовой шириной спектра излучения.

Авторы: М. Ю. Третьяков, А. П. Шкаев, А. М. Киселев, С. Б. Бодров, А. В. Андрианов, Д. С. Макаров

6. Создан уникальный прямоточный высокоскоростной ветро-волновой канал на базе Большого термостратифицированного бассейна ИПФ РАН.

Параметры установки: длина рабочей части, ширина и высота рабочего канала 7 м, 0,4 м и 0,4 м, соответственно; рабочие скорости ветра 3-25 м/с (эквивалентные скорости ветра 6-60 м/с).

Установка обеспечена оборудованием для проведения измерений параметров ветра, волнения и течений и позволяет проводить моделирование взаимодействия океана и атмосферы в широком диапазоне скоростей ветра от слабых до ураганных, включая тепло-массо-энергообмен в атмосферном пограничном слое; образование пены и брызг; формирование коротковолновой части спектра поверхностных волн и динамику верхнего слоя стратифицированного океана.

Авторы: Ю. И. Троицкая, Казаков В.И., Сергеев Д.А. Коротков Д.П., Дюнин Е.В.

7. При пробое воздуха лазерным излучением за счет добавления второй гармоники оптического излучения получено повышение эффективности генерации терагерцового излучения в лазерной искре более, чем на пять порядков, что соответствует мировому уровню. Продемонстрирована возможность управления параметрами генерируемого терагерцового излучения (интенсивностью, диаграммой направленности, поляризацией). Предложена теоретическая модель, объясняющая полученные экспериментальные результаты особенностями формирования низкочастотного отклика среды при туннельной ионизации газа в поле фемтосекундных лазерных импульсов.

Авторы: Р.А.Ахмеджанов, И.Е.Иляков, В.А.Миронов, Е.В.Суворов, Д.А.Фадеев, Б.В.Шишкин

8. Для диагностики злокачественных опухолей разработан эндоскопический прибор на основе метода кросс-поляризационной отражательной спектроскопии на оптическом волокне, сохраняющем поляризацию. Совместимость оптических зондов прибора (диаметр зонда 1.4 мм) с рабочими каналами стандартных эндоскопов (бронхоскопов, артероскопов и др.) делает слизистые оболочки полых органов, эндотелий сосудов, серозные оболочки полостей и суставов доступными для исследования методом кросс-поляризационной отражательной спектроскопии.

Авторы: В. А. Каменский, И. В. Турчин, А. Н. Морозов, А. В. Мяков, П. Д. Агрба, А. В. Жеглов, Н. М. Шахова.

9. Разработан цифровой голографический метод оптической когерентной томографии для трехмерной визуализации внутренней структуры биотканей с продольным пространственным разрешением в единицы микрон. Предлагаемый метод

устраняет необходимость в поперечных сканирующих системах, свободен от присущего традиционному методу оптической когерентной томографии ограничения сверху на апертуру приема рассеянного излучения и в пределе имеет субволновое поперечное пространственное разрешение.

Авторы: Д. В. Шабанов, Г. В. Геликонов, В. М. Геликонов.

10. В 2007-2009 гг. в районе шельфа и свала глубин северо-восточной части Черного моря проведена серия уникальных комплексных подспутниковых экспериментов с целью развития дистанционных методов диагностики верхнего слоя океана. Идентифицированы и выяснены причины возникновения неоднородностей, наблюдаемых на спутниковых радиолокационных панорамах океана. Найдено, что полосовые сликовые структуры в прибрежной зоне моря связаны с концентрацией поверхностно-активных веществ, ориентированы вдоль основного направления струйного течения и локализованы в зонах конвергенции поперечных компонент течений, обусловленных обтеканием рельефа дна. Показано, что фронтальная зона на спутниковом РСА-изображении совпадает с областью резких изменений скорости ветра, течений и температуры воды и воздуха.

Авторы: С.А. Ермаков, Э.М. Зуйкова, И.А.Капустин, Т.Н. Лазарева, Е.В. Макаров, И.А. Сергиевская, В.И. Титов, В.В. Баханов, Н.А.Богатов, А.В. Ермошкин, В.И. Казаков, О.Н. Кемарская, Ю.И. Троицкая

11. Разработана и апробирована технология численного моделирования задач динамики взаимодействия жидкости со сложными упругими конструкциями, в основе которой лежит метод верификации результатов счета на масштабных физических моделях. Созданные по данной технологии численные модели обладают высокой степенью достоверности, что позволяет их использовать для поиска источников виброактивности, визуализации вибрационного и акустического полей в условиях малого количества измерительных данных, анализа динамики в области упругопластических деформаций, акустического проектирования и прогноза уровня акустического поля. Достоверность результатов моделирования подтверждена экспериментально с использованием масштабных моделей исследуемых конструкций для силы цели, поля излучения, локализации приложения переменных сил. Путем сопоставления численных результатов с измерениями, выявлено, что погрешность расчета уровня акустических полей не превышает 3-5дБ.

Авторы: В.В. Артельный, П.В. Артельный, П.И. Коротин, М.Б. Салин, Е.М. Соков, А.С. Суворов

12. Обнаружены квазимонохроматические (с периодами 10-20 мин) составляющие в частотных спектрах флуктуаций электрического поля и количества электрических разрядов мощных грозовых облаков, дрейфующие по частоте в процессе зарождения, активизации и распада грозы. Данный эффект служит проявлением коллективных процессов при формировании электрической структуры облака и открывает возможность дистанционной диагностики электроактивных зон грозовых облаков.

Авторы: В. В. Клименко, Е. А. Мареев, Ю. В.Шлюгаев

13. Предложено для повышения эффективности генерации высоких гармоник лазерного излучения в газах использовать частотные аномалии в сечениях свободно-

связанных электронных переходов. На примере инертных газов теоретически показано, что для многоэлектронных атомов, обладающих гигантским резонансом в сечении фоторекомбинации, при оптимальном выборе длины волны лазерного излучения эффективность преобразования в высшие гармоники может быть на несколько порядков величины выше, чем для других атомов той же группы.

Авторы: Емелин М.Ю., Рябикин М.Ю. (ИПФ РАН), Манаков Н.Л., Саранцева Т.С., Фролов М.В. (ВорГУ), A.F. Starace (The University of Nebraska, Lincoln, США)

14. Создан метод приближенного аналитического описания модовой структуры поля в подводном звуковом канале (ПЗК) с флуктуациями скорости звука, вызванными случайными внутренними волнами. Метод базируется на совместном использовании (i) стохастической лучевой теории, развитой авторами для описания хаотической динамики лучей в случайно-неоднородном ПЗК, и (ii) соотношений, устанавливающих связь между лучевым и модовым представлениями поля в волноводе. Получено аналитическое описание перераспределения звуковой энергии между модами вследствие рассеяния волн на неоднородностях среды. Проанализированы искажения звуковых импульсов, переносимых отдельными модами. Показано, что на тысячекилометровых трассах флуктуации скорости звука вызывают уширение импульсов пропорциональное $r^{3/2}$, где r – дистанция наблюдения, и смещение времен их прихода пропорциональное r^2 .

Авторы: А.Л. Вировлянский, А.Ю. Казарова, Л.Я. Любавин

**II. РЕЗУЛЬТАТЫ,
ПРЕДСТАВЛЯЕМЫЕ
В ОТЧЕТ РАН ПО РАЗДЕЛУ
«ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
В ОБЛАСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ,
ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК»**

1. Отделение физики плазмы и электроники больших мощностей

1.1. Реализованы две разновидности мощных импульсных терагерцовых гиротронов с рекордными параметрами:

- традиционный генератор с магнитным полем до 50 Тл, работающий на основном циклотронном резонансе и обеспечивающий в разовых импульсах длительностью 30-40 мкс генерацию на частотах 1 и 1,3 ТГц мощностью 5 и 0,5 кВт соответственно;

- гиротрон с приосевым электронным пучком с магнитным полем до 14 Тл, работающий на второй и третьей циклотронных гармониках и обеспечивающий генерацию на четырех частотах в диапазоне 0,5-1,0 ТГц в импульсах длительностью 10 мкс мощностью 0,3-1,8 кВт.

Авторы: В.Л. Братман, М.Ю.Глявин, А.Г. Лучинин, Ю.К. Калынов, В.Н. Мануилов

Аннотация. Для создания импульсных терагерцовых гиротронов в ИПФ РАН развиваются два дополняющих друг друга направления:

- 1) повышение частоты генерации при работе на основном циклотронном резонансе за счет создания соленоидов с очень сильным магнитным полем,

- 2) переход к работе на высоких циклотронных гармониках и сравнительно низких магнитных полях с обеспечением высокой селективности взаимодействия электронов с модой резонатора за счет использования моноосевых электронных пучков вместо полиосевых пучков в традиционных гиротронах.

При развитии первого направления оптимизация электроннооптической системы позволила значительно - до 5 кВт - повысить мощность излучения на частоте 1 ТГц. Модернизация источника питания позволила увеличить ток соленоида и получить поля до 50 Тл; благодаря этому получена генерация с мощностью 0,5 кВт на рекордной для гиротронов частоте 1,3 ТГц. После 3500 импульсов при полях выше 35 Тл не выявлено изменений характеристик соленоида. Важно отметить, что в зарубежных разработках соленоиды с полями 25-30 Тл, разрушались после нескольких десятков импульсов.

Селективное возбуждение высоких гармоник является сложной задачей для традиционных гиротронов из-за снижения связи электронов с волнами и конкуренции мод, но она может быть решена в конфигурации гиротрона с большой орбитой (ГБО), где используется моноосевой пучок, частицы которого двигаются по винтовым траекториям с осью, совпадающей с осью резонатора. В ИПФ накоплен большой опыт реализации ГБО с релятивистскими энергиями частиц и частотой излучения до 0,4 ТГц. В отличие от этого, в новом ГБО энергия электронов 80 кэВ типична для слаборелятивистских гиротронов, а рабочее поле 13,7 Тл сравнительно невелико. Для формирования электронного пучка использована пушка с каспом магнитного поля и большой (в 3000 раз по площади) последующей компрессией пучка, которая удовлетворительно работала в широких диапазонах напряжений 50-80 кВ и магнитных полей 10,5-14 Тл. Соответственно, в эксперименте наблюдалась селективная генерация не только на выбранной рабочей моде $TE_{3,7}$, возбуждавшейся на третьей циклотронной гармонике с частотой 1,00 ТГц и выходной мощностью 0,4 кВт, но и на трех других модах, резонансных с частицами на второй ($TE_{2,4}$, $TE_{2,5}$) и на третьей ($TE_{3,6}$) гармониках. Частоты и выходные мощности для этих мод равны, соответственно, 0,54, 0,68, 0,87 ТГц и 0,6, 1,8, 0,3 кВт.

Публикации

1. V. Bratman, M.Glyavin, T.Idehara, Yu.Kalynov, A.Luchinin, V.Manuilov, S.Mitsudo, I.Ogawa, T. Saito, Y.Tatematsu, V.Zapevalov. "Review of Sub-Terahertz and Terahertz

Gyrodevices at IAP RAS and FIR FU”, IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37, 1, 36-43.

2. V.L. Bratman, Y.K. Kalynov, and V.N. Manuilov “Large-Orbit Gyrotron Operation in the Terahertz Frequency Range”, Phys. Rev. Lett., V. 102, No. 24, 245101, 2009.
3. В.Л. Братман, Ю.К. Калынов, В.Н. Мануилов «Субтерагерцовые и терагерцовые гиротроны с большой орбитой», Изв.вузов «Радиофизика», т. 52, № 7-8, 2009.
4. М.Ю. Глявин, В.Л. Братман, Ю.К. Калынов, А.Г. Лучинин, В.Н. Мануилов «Мощные импульсные гироприборы терагерцового диапазона», Материалы 19-ой Межд. Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (CriMiCo'2009), Севастополь, Крым, Украина, 2009, с. 214-215.

1.2. Разработан и успешно испытан опытный образец промышленной установки для высокоскоростного выращивания поликристаллических алмазных пленок и пластин большой площади (более 100 см²). В созданной установке за счет поддержания плазмы высокой плотности излучением гиротрона на частоте 28 ГГц скорость роста алмазных пленок высокого качества достигает не менее 10 мкм/час, что значительно превосходит скорость роста в существующих СВЧ реакторах, в которых плазма поддерживается излучением на частотах 915 МГц и 2,45 ГГц.

Авторы: Быков Ю.В., Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Горбатушков В.Н., Денисов Г.Г., Еремеев А.Г., Калынова Г.И., Козлов А.В., Копелович Е.А., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Корчагин В.В., Литвак А.Г., Мучников А.Б., Овечкин Н.М., Плотников И.В., Радищев Д.Б., Троицкий М.М., Флат Ф.А., Холопцев В.В. (ИПФ РАН, ЗАО НПП «ГИКОМ»)

Аннотация. Учреждение Российской академии наук Институт прикладной физики РАН совместно с ЗАО НПП "ГИКОМ" (г. Нижний Новгород) разработали, изготовили и успешно испытали опытный образец промышленной установки для выращивания поликристаллических алмазных пленок в плазме, создаваемой излучением непрерывного гиротрона на частоте 28 ГГц. Общий вид установки приведен на рис.1.

Установка позволяет выращивать алмазные пленки и пластины большой площади (более 100 см²) со скоростью роста не менее 10 мкм/час. За счет получения плазмы высокой плотности с помощью волновых пучков в созданном реакторе скорость роста алмазных пленок высокого качества значительно превосходит скорость роста в существующих СВЧ реакторах, в которых плазма поддерживается излучением на частотах 915 МГц и 2,45 ГГц. Примененный подход к созданию плазменного слоя над подложкой позволяет в будущем перейти к осаждению пленок на подложках больших размеров, изменяя форму и размеры поперечного сечения волновых пучков.

Проведенные испытания опытного образца промышленной установки для выращивания поликристаллических алмазных пленок в плазме, создаваемой излучением гиротрона, показали, что установка имеет следующие основные характеристики: мощность гиротрона до 15.1 кВт, скорость роста алмазных пленок более 10 мкм/час при диаметре подложки 75 мм, рабочее давление 200-300 Торр. Испытания опытных образцов алмазных пленок и пластин показали, что опытные образцы имеют теплопроводность 1810-1860 Вт/К·м, близкую к теплопроводности натурального алмаза.

Полученные результаты (разработанная технология высокоскоростного выращивания поликристаллического алмаза и установка для ее реализации, а также синтезируемые на ней материалы - алмазные пленки и пластины) будут использованы в следующих отраслях:

- электроника – теплоотводящие подложки для СВЧ транзисторов и других приборов, окна для клистронов и гиротронов мегаваттной мощности, полевые

транзисторы на гидрогенизированной поверхности алмаза, МЭМС; СВЧ- приборы акустоэлектроники;

- ядерная техника, ускорители – радиационно-стойкие детекторы ионизирующего излучения (в том числе медицинского назначения), оптика (окна, линзы, монохроматоры) синхротронного излучения;
- лазерная техника - полупроводниковые лазеры (линейки) на алмазных теплоотводах, окна для мощных технологических CO₂ лазеров;
- электрохимия - коррозионностойкие электроды на основе проводящих нанокристаллических алмазных покрытий, в том числе в процессах очистки воды;
- обрабатывающая промышленность - сверхтвердый алмазный инструмент для прецизионной и высокоскоростной обработки материалов и композитов.

Повышение скорости роста приведет к удешевлению стоимости CVD алмазных материалов и будет способствовать широкому внедрению CVD алмаза в промышленность России и созданию новых приборов и инструментов.



Рис. 1. Общий вид опытного образца промышленной установки для выращивания поликристаллического алмаза в плазме, создаваемой излучением гиротрона.

Публикации

1. Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Kozlov A.V. et al., Diamond films grown by millimeter wave plasma-assisted CVD reactor, *Diamond and Related Materials*, 2006, v.15, p.502-507.
2. Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Kozlov A.V. et al., Microcrystalline diamond growth in presence of argon in millimeter-wave plasma-assited CVD reactor, *Diamond and Related Materials*, 2008, v.17, p.1055.
3. Vikharev AL, Gorbachev AM, Kozlov AV, Litvak AG, Muchnikov AB, Ovechkin NM, Radishev DB, CVD technology for high-rate growth of nano- and polycrystalline diamonds,
4. Труды 2-го международного форума по нанотехнологиям, 6-8 октября 2009г.. г.Москва.

1.3. Разработан источник экстремального ультрафиолетового излучения на основе разряда низкого давления, поддерживаемого мощным электромагнитным излучением миллиметрового диапазона длин волн в условиях электронно-циклотронного резонанса в парах олова, инжектируемых в магнитную ловушку из вакуумно-дугового разряда. В экспериментах мощность линейчатого излучения многозарядных ионов олова с длиной волны 13,5 нм в полосе $\pm 1\%$ достигала 50 Вт. К.п.д. преобразования поглощенного в плазме СВЧ излучения в экстремальный ультрафиолет достигает 1%, что сравнимо с лучшими мировыми достижениями.

Авторы: А.В. Водопьянов, С.В. Голубев, Д.А. Мансфельд (ИПФ РАН); А.Г. Николаев, К.П. Савкин, Г.Ю. Юшков (ИСЭ СО РАН, Томск); Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало (ИФМ РАН, Нижний Новгород).

Аннотация. В настоящее время в мире ведутся интенсивные исследования, направленные на создание источника излучения для проекционной литографии высокого разрешения с длиной волны 13.5 нм. В наиболее эффективных источниках излучения используется линейчатое излучение многозарядных ионов олова, (более 100 линий излучения ионов олова с зарядом от +6 до +11 попадают в указанный диапазон). В основном, для получения такой плазмы используются установки с мощными лазерами или с различного типа пинчами. Наряду с ощутимым прогрессом в этом направлении у разрабатываемых схем есть ряд недостатков, которые не позволяют считать проблему создания источника экстремального ультрафиолета решенной. Прежде всего, отметим проблемы, связанные с ресурсом работы источника, с загрязнением элементов оптической системы распыляемыми веществами, с бомбардировкой поверхности зеркал быстрыми ионами. Поиски новых источников экстремального ультрафиолета остаются актуальными в настоящее время.

Одним из перспективных источников экстремального ультрафиолетового излучения представляется разряд низкого давления в парах олова, поддерживаемый в магнитной ловушке мощным электромагнитным излучением миллиметрового диапазона длин волн в условиях электронно-циклотронного резонанса. Получение многозарядных ионов металлов происходит следующим образом. В прямую магнитную ловушку с помощью вакуумно-дугового источника инжектируется плазма паров олова. За время пролета плазмы магнитной ловушки, нагреваемые СВЧ излучением электроны производят дополнительную ионизацию и заряд ионов повышается – образуются ионы, линии излучения которых лежат в диапазоне экстремального ультрафиолета. Использование миллиметрового излучения и миниатюрных вакуумно-дуговых плазмогенераторов позволяет получать источники со сравнительно малыми размерами (поперечные размеры излучающей области ~ 1 мм) с достаточно высокой плотностью плазмы (до 10^{14} см⁻³), что делает описанный метод весьма привлекательным для создания почти точечного источника экстремального ультрафиолета.

Публикации

1. А.В. Водопьянов и др. // Письма в ЖЭТФ, том 88, вып. 2, стр. 103-106.
2. A.V. Vodopyanov. Abstracts of The 35th IEEE International Conference on Plasma Science. June 15–19, 2008, Karlsruhe, Germany.

1.4. При пробое воздуха лазерным излучением за счет добавления второй гармоники оптического излучения получено повышение эффективности генерации терагерцового излучения в лазерной искре более, чем на пять порядков, что соответствует мировому уровню. Продемонстрирована возможность управления параметрами

генерируемого терагерцового излучения (интенсивностью, диаграммой направленности, поляризацией). Предложена теоретическая модель, объясняющая полученные экспериментальные результаты особенностями формирования низкочастотного отклика среды при туннельной ионизации газа в поле фемтосекундных лазерных импульсов.

Авторы: Р.А.Ахмеджанов, И.Е.Иляков, В.А.Миронов, Е.В.Суворов, Д.А.Фадеев, Б.В.Шишкин

Аннотация. Экспериментально и теоретически исследована генерация широкополосного терагерцового излучения при оптическом пробое атмосферного воздуха бихроматическим фемтосекундным лазерным излучением. Для генерации второй гармоники оптического излучения в экспериментах использовался кристалл ВВО (бета-борат бария) толщиной 100 мкм, вырезанный под углом, обеспечивающим синхронизм первого типа. Показано, что добавка к основному излучению поля на удвоенной частоте на уровне энергии порядка 10% от энергии первой гармоники приводит к увеличению эффективности генерации терагерцовых импульсов более чем на четыре порядка. При этом наблюдалось заметное расширение спектра терагерцового излучения в сторону более высоких частот. Диаграмма направленности при этом имела максимум в направлении оси разряда и была симметрична относительно этой оси. При точной юстировке кристалла ВВО (когда поляризация второй гармоники оптического излучения ортогональна поляризации первой гармоники) поляризация терагерцового излучения была линейна и совпадала по направлению с поляризацией второй гармоники. Экспериментально был найден оптимальный угол между осью кристалла и поляризацией основной гармоники, при котором эффективность генерации терагерцового излучения максимальна. При этой оптимальной ориентации кристалла имел место эффект поворота плоскости поляризации терагерцового импульса при сдвиге кристалла вдоль оси симметрии. Предложена теоретическая интерпретация полученных результатов, основанная на вычислении источника низкочастотного тока, возникающего при туннельной ионизации нейтральных атомов. Получены аналитические выражения, описывающие зависимости наблюдаемых амплитудных характеристик терагерцового излучения от различных параметров, таких как амплитуды первой и второй гармоник, разность фаз между полем на основной и удвоенной частоте, а также поляризация лазерного импульса. Показано хорошее качественное соответствие между теоретическими и экспериментальными результатами.

Публикации

1. Р.А. Ахмеджанов, И.Е. Иляков, В.А. Миронов, Е.В. Суворов, Д.А. Фадеев, Б.В. Шишкин. «О генерации терагерцового излучения при оптическом пробое в поле бихроматического лазерного импульса». // ЖЭТФ. 2009, т. 136, с. 419.
2. Р.А. Ахмеджанов, И.Е. Иляков, В.А. Миронов, Е.В. Суворов, Д.А. Фадеев, Б.В. Шишкин. «Влияние спектрального состава лазерного импульса и постоянного электрического поля на эффективность генерации терагерцового излучения при оптическом пробое в воздухе». // Изв. ВУЗов Радиофизика. 2009. (принята к печати).

1.5. Обнаружены квазимонохроматические (с периодами 10-20 мин) составляющие в частотных спектрах флуктуаций электрического поля и количества электрических разрядов мощных грозовых облаков, дрейфующие по частоте в процессе зарождения, активизации и распада грозы. Данный эффект служит проявлением коллективных процессов при формировании электрической структуры облака и открывает возможность дистанционной диагностики электроактивных зон грозовых облаков.

Авторы: В. В. Клименко, Е. А. Мареев, Ю. В. Шлюгаев

Аннотация. С целью анализа тонкой структуры электрического поля грозовых облаков были проведены измерения возмущений электрического поля на Волжской Гидрометеорологической обсерватории (г.Городец) и в двух пунктах в Нижнем Новгороде во время интенсивных гроз 2005-2009 гг. Для исследования временной структуры электрической активности грозового облака на временных масштабах менее ~30 мин. применены методы спектрального анализа флуктуаций кулоновского поля, включающие: 1) отделение «гладкой» части возмущений электрического поля от импульсной компоненты, связанной с короткими (3-5 с) скачками поля во время разрядов, в результате чего получены средние значения поля со скважностью 1 значение за 100 с.; 2) выделение главной НЧ вариации Е-поля с временным масштабом порядка времени жизни грозовой ячейки ($T \geq 30$ мин.) методом скользящего среднего по 18 точкам ($\Delta T \sim 1800$ с); 3) выделение флуктуационной части Е-поля, как разности между исходными вариациями и главной НЧ частью; 4) применение к полученной флуктуационной части методов адаптивного спектрального анализа, как наиболее чувствительного к присутствию моно- и квазимонохроматических компонент в частотном спектре. Число разрядов в единицу времени характеризует критическое состояние электрически активной зоны в грозовом облаке, а изменения числа разрядов являются временной характеристикой этих критических состояний. Чтобы установить наличие или отсутствие связи между квазимонохроматическими флуктуациями Е-поля и флуктуациями плотности разрядов был предпринят совместный анализ этих двух характеристик. Были выполнены преобразования БПФ флуктуаций поля и плотности разрядов для всего временного интервала, покрываемого грозой. В качестве сглаживающего окна применено спектральное окно Блэкмана-Хэрриса с уровнем боковых лепестков -74 дБ. Полученные спектральные плотности демонстрируют на обоих спектрах явные максимумы практически на одних и тех же частотах (соответствующих периодам 10-20 мин), что подтверждается и вычислением взаимной спектральной плотности.

Результаты важны для изучения природы грозового электричества и дистанционной диагностики электроактивных зон мощных грозовых облаков.

Публикации

1. Mareev E.A. Formation of Charge Layers in the Planetary Atmospheres // Space Science Reviews. 2008. Vol.137, N1-4. doi:10.1007/s11214-008-9306-2.
2. В. В. Клименко. Спектральные характеристики флуктуаций электрического поля в окрестности грозовых облаков.// Конференция «Высокоширотные гелиогеофизические явления» памяти Е.А.Пономарёва. Тезисы докладов. Иркутск 2009. С.23.
3. V. V. Klimenko, E.A.Mareev, Yu.V.Shlyugaev. Search for experimental evidence of collective effects in thunderstorm clouds.// Plasma-wave processes in the Earth's and planetary magnetospheres, ionospheres and atmospheres. International conference. 13-17 April 2009. Abstracts. Nizhny Novgorod, 2009. P.78-79.
4. Yu. V. Shlyugaev, V.V. Klimenko, E.A. Mareev, On the Role of Electric Field Changes when Calculating Thunderstorm Currents, Workshop on Coupling of Thunderstorms and Lightning Discharges to Near-Earth Space 23-27 June 2008, University of Corsica, Corte, France.

5. В. В. Клименко, Ю.В.Шлюгаев, Е.А.Мареев, В.В.Соколов, А.А.Панютин, В.П.Денисов, С.В.Анисимов. Характеристики атмосферного электричества в Верхне-Волжском регионе // Метеорология и гидрология (направлена в печать).
6. В. В. Клименко, А.В.Бирюков. Спектральные характеристики флуктуаций электрического поля в окрестности грозового облака // Сборник трудов VI Рос. конф. по атмосферному электричеству, 1-7 октября, 2007. С.116-117.
7. Ю. В. Шлюгаев, В.В.Клименко, Е.А.Мареев. Выбор доступных методов и формирование критериев оценки грозовой активности на масштабах от локального до глобального // Сборник трудов VI Рос. конф. по атмосферному электричеству, 1-7 октября, 2007. С.64а-64в

1.6. Разработан гиротронный комплекс для Динамической Ядерной Поляризации в ЯМР-спектрометрах (DNP/NMR). Системы ядерной магнитной спектроскопии (ЯМР или NMR) могут существенно повысить чувствительность и разрешающую способность за счет динамической поляризации ядер (DNP) путем приложения СВЧ поля на испытуемый образец, находящегося в условиях резонанса в магнитостатическом поле. Комплекс включает высокостабильный гиротрон на второй гармонике циклотронной частоты с непрерывной мощностью 100 Вт на частоте 258,9 ГГц (долговременная стабильность мощности порядка 1%, частоты 10^{-5}), криомагнит, блоки питания, а также внешний квазиоптический преобразователь и линию передачи.

Авторы: А.А.Богдашов, Н.П.Венедиктов, Г.Г.Денисов, В.В.Дубров, Н.А.Завольский, В.Е.Запелалов, Е.А.Копелович, С.Ю.Корнишин, А.В.Котов, А.Н.Куфтин, О.В.Малыгин, В.Н.Мануилов, М.А.Моисеев, А.С.Седов, А.Ш.Фикс, В.И.Цалолыхин, А.В.Чирков (ИПФ РАН), совместно с ЗАО НПП «ГИКОМ»

Аннотация. В соответствии с потребностями различных научно-технических приложений, таких как диагностика плотной плазмы, спектроскопия, исследование нелинейной динамической поляризации (DNP) атомов и молекул и других, в последнее время усилился интерес к источникам когерентного СВЧ излучения диапазона частот порядка 200-600 ГГц с выходной мощностью 10-100 Вт. Системы ядерной магнитной спектроскопии (ЯМР или NMR) могут существенно повысить чувствительность и разрешающую способность за счет динамической поляризации ядер (DNP) путем приложения СВЧ поля на испытуемый образец, 'находящегося в условиях резонанса в магнитостатическом поле. Поляризация спинов электронов передается спинам ядер испытуемого вещества. Для использования в такой установке с магнитным полем около 10 Т требуются источники, работающие на частоте 260 ГГц с мощностью 0,1 кВт в непрерывном режиме. Одним из наиболее перспективных источников такого уровня частоты и мощности представляются гиротроны. Разработка таких гиротронов в России выполняется впервые и ведется в кооперации двух организаций: ИПФ РАН и НПП «ГИКОМ» в течение 2 лет.

В связи со сложностью создания сильных магнитных полей в достаточных объемах гиротроны этого диапазона проектируются на гармониках гирочастоты. Для реализации высокостабильного непрерывного гиротрона на второй гармонике циклотронной частоты с выходной мощностью 0,1кВт выбрана рабочая мода цилиндрического резонатора TE_{2,3,1}, взаимодействующая с электронным пучком при энергии электронов 15 кэВ и токах 0,3-0,4 А. Проведена оптимизация параметров электронно-оптической системы и резонатора с учетом больших омических потерь для достижения требуемой выходной мощности и стабильности излучения. На основе анализа процессов, влияющих на стабильность выходных параметров гиротрона, сформулированы требования к стабильности

источников питания. Разработан специальный криомагнит с необходимым распределением магнитостатического поля и малым расходом криожидкостей.

Сложная рабочая мода, выходящая из гиротрона через барьерное окно гиротрона преобразуется в гауссов волновой пучок наружным квазиоптическим преобразователем, состоящем из четырех профилированных рефлекторов. Показано, что для эффективной транспортировки излучения применима мода HE₁₁ гофрированного волновода. Линия передачи включает отрезки гофрированных волноводов с малыми потерями, поворотные уголки, переключатель на два направления, поляризатор, аттенюатор, calorиметрическую нагрузку и направленные ответвители для детекторов. При общей длине линии около 16 метров расчётные потери в линии передачи составляют менее 20%. В системе использованы специальные источники питания накала катода гиротрона и встроенного магниторазрядного насоса.

Гиротрон (рис. 1) и остальные компоненты комплекса был первоначально испытан на специально доработанном стенде в ИПФ РАН, а затем в институте биофизической химии университета Франкфурта на Майне (Германия). При испытаниях получена требуемая мощность (порядка 100 Вт, см. рис. 2) в непрерывном режиме на частоте 258,9 ГГц (долговременная стабильность мощности порядка 1%, частоты 10⁻⁵).

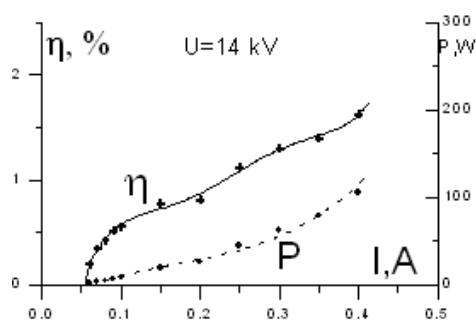


Рис. 1

Рис. 2

Публикации

1. V.Bratman, M.Glyavin, T.Idehara, Yu.Kalynov, A.Luchinin, V.Manuilov, S.Mitsudo, I.Ogawa, T.Saito, Y.Tatematsu, V.Zapevalov. Review of Sub-Terahertz and Terahertz Gyrodevices at IAP RAS and FIR FU. Int. Journal IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 37, issue 1, pp. 36-43, (2009)2.
2. V.E.Zapevalov, A.Sh.Fix, E.A.Kopelovich, A.N.Kuftin, O.V.Malygin, V.N.Manuilov, M.A.Moiseev, A.S.Sedov. Development of 260 GHz Second Harmonic CW Gyrotron with high stability of output parameters. Abstracts of Strong microwaves: sources and applications. VII International Workshop. Nizhny Novgorod, Russia, July27-August 2. 2008, p. 35.
3. А.А.Богдашов, Г.Г.Денисов, Н.А.Завольский, В.Е.Запелалов, Е.А.Копелович, А.Н.Куфтин, О.В.Мальгин, В.Н.Мануилов, М.А.Моисеев, А.С.Седов, А.Ш.Фикс, А.В.Чирков. Проект гиротронного комплекса для ДПЯ-спектроскопии. Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Н.Новгород.2009. с.46-47.
4. V.E.Zapevalov, V.V.Dubrov, A.Sh.Fix, E.A.Kopelovich, A.N.Kuftin, O.V.Malygin, V.N.Manuilov, M.A.Moiseev, A.S.Sedov, N.P.Venediktov, N.A.Zavolsky, The 34-th Int. Conference on Infrared and Millimeter Waves and 17-th Int. Conference on Terahertz Electronics, 2009, Sept.20- Sept.27 Busan, Korea, Conference Digest, p.W3D04.0389.

5. А.А.Богдашов, Г.Г.Денисов, Н.А.Завольский, В.Е.Запечалов, Е.А.Копелович, А.Н.Куфтин, О.В.Малыгин, В.Н.Мануилов, М.А.Моисеев, А.С.Седов, А.Ш.Фикс Разработка высокостабильного гиротронного комплекса на частоте 260 ГГц для задач динамической поляризации ядер. Материалы 16 координационного научно-технического семинара по СВЧ-технике. Н.Новгород 2009, с.27-29.6. Н.А.Завольский, В.Е.Запечалов, О.В.Малыгин, М.А.Моисеев, А.С.Седов. Оптимизация резонатора непрерывного 258 ГГц гиротрона на второй гармонике гирочастоты. // Изв. вузов. Радиофизика, 2009. Т.52. №5-6. С.5417. V.E.Zapevalov, A.Sh.Fix, E.A.Kopelovich, A.N.Kuftin, O.V.Malygin, V.N.Manuilov, M.A.Moiseev, A.S.Sedov. Development of 260 GHz Second Harmonic CW Gyrotron with high stability of output parameters. Proceedings of Strong microwaves: sources and applications. VII International Workshop. Nizhny Novgorod, pp. 117-121.

1.7. Предложен и проанализирован новый механизм преобразования предельно коротких лазерных импульсов в когерентное терагерцовое излучение, использующий явление возбуждения излучающих колебаний в плазме электрическим полем самого ионизирующего импульса и отличающийся от рассматривавшихся ранее механизмов гораздо более высокой (вплоть до значений $\sim 10\%$) эффективностью преобразования. Показано, что это явление может быть использовано как для генерации терагерцового излучения гигаваттного уровня мощности, так и для диагностики фазовой структуры предельно коротких лазерных импульсов.

Авторы: Н.В. Введенский, В.Б. Гильденбург, В.А. Костин, А.А. Силаев

Аннотация. Предложенный и исследованный механизм преобразования оптического излучения в терагерцовое основан на явлении возбуждения излучающих плазменных колебаний непосредственно в процессе ионизации газа лазерным импульсом предельно короткой длительности (составляющей малое число периодов оптического поля). Начальный толчок для возбуждения колебаний производится в этом случае непосредственно самим оптическим электрическим полем, сообщаям каждому свободному электрону после его отрыва от атома большую (зависящую от фазы поля) постоянную составляющую скорости. Хотя взаимодействие лазерного импульса со средой в целом является при этом нелинейным, сам по себе рассматриваемый механизм возбуждения колебаний (если отвлечься от нелинейности, связанной с процессом ионизации) по сути дела является линейным (или «линейно-параметрическим») по отношению к возбуждающему оптическому полю (полю накачки) и, следовательно, способен обеспечить гораздо более высокую эффективность преобразования этого поля в поле излучения возбуждаемых колебаний. Разработаны полуклассические и квантовомеханические подходы к описанию этого явления и найдены оптимальные параметры лазерных импульсов, отвечающие наибольшей эффективности генерации терагерцовых волн. Проведенные исследования динамики поля и плазмы в процессе оптического пробоя газа показали, что при оптимальных значениях абсолютной фазы поля в лазерном импульсе (разности фаз между несущей и огибающей) волны поляризации, возбуждаемые в кильватерном следе импульса, могут обеспечить очень высокий (гигаваттный) уровень пиковой мощности терагерцового излучения уже при весьма умеренных значениях оптической интенсивности ($\sim 10^{14} - 10^{15}$ Вт/см²). Эффективность преобразования при этом существенно превышает достигающуюся при других (нелинейных) механизмах возбуждения плазменных колебаний и в оптимальных условиях может достигать значений порядка 10%. Возможность использования рассмотренного явления для генерации сверхмощного терагерцового излучения и для решения важной задачи фазовой диагностики в предельно коротких лазерных импульсах

ставят исследование ионизационно-колебательных процессов в таких импульсах в ряд первостепенных проблем физики лазерной плазмы.

Публикации

1. A.A. Silaev, N.V. Vvedenskii. "Residual-current excitation in plasmas produced by few-cycle laser pulses". // Physical Review Letters, 2009, v. 102, p. 115005.
2. V.B. Gildenburg, N.V. Vvedenskii. "Optical-to-THz wave conversion via excitation of plasma oscillations in the tunneling-ionization process". // Physical Review Letters, 2007, v. 98, p. 245002.
3. A.A. Silaev, N.V. Vvedenskii. "Quantum-mechanical approach for calculating the residual quasi-dc current in a plasma produced by a few-cycle laser pulse". // Physica Scripta, 2009, v. T135, p. 014024.
4. Н.В. Введенский, А.А. Силаев. «Ускорение электронов и генерация квазипостоянного тока в процессе ионизации газа предельно коротким лазерным импульсом». // Вопросы атомной науки и техники, 2008, № 4. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (6), с. 231.
5. Н.В. Введенский, В.Б. Гильденбург. «Прямое преобразование ультракоротких лазерных импульсов в терагерцовое излучение в процессе оптического пробоя газа». // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2007, № 1, с. 65.
6. V.A. Kostin, N.V. Vvedenskii. "Broadband terahertz emission from a long plasma channel created in air by axicon-focused laser pulses". // Physical Review Letters, 2009 (submitted).
7. V.A. Kostin, N.V. Vvedenskii. "Superluminous ionization front as an effective source of broadband THz radiation". // Proceedings of the 34th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2009, paper W4A05.

1.8. На основе наблюдений радиолиний ряда молекул обнаружено возрастание степени ионизации плотного молекулярного газа вблизи молодых звезд большой светимости. Показано, что наблюдаемые вариации химического состава газа в этих областях могут быть обусловлены вариациями степени ионизации.

Авторы: И.И. Зинченко, Л.Е. Пирогов (ИПФ РАН); Paola Caselli (University of Leeds)

Аннотация. Степень ионизации является одним из основных параметров межзвездного вещества. Считается, что ионизация плотного газа в молекулярных облаках обусловлена, в основном, космическими лучами, а мощное УФ излучение горячих звезд не проникает вглубь этих облаков (в однородных моделях). Проводившиеся ранее исследования степени ионизации в массивных сгустках не выявили заметных различий между периферией и центром этих объектов (Bergin et al. 1999, ApJ, 512, 724).

Оценить степень ионизации (X_e) можно на основе химического моделирования. В частности, с учетом основных реакций образования и разрушения, относительная концентрация радикала HCO^+ определяется этим параметром:

$$X(\text{HCO}^+) = \frac{k_1 X(\text{H}_3^+) X(\text{CO})}{\alpha(\text{HCO}^+) X_e + k_g X_g}$$

$$X(\text{H}_3^+) = \frac{\zeta / n}{k_1 X(\text{CO})}$$

$$X(\text{HCO}^+) = \frac{\zeta / n}{\alpha(\text{HCO}^+)X_e + k_g X_g}$$

Здесь ζ – скорость ионизации молекулярного водорода космическими лучами, n – концентрация газа, $\alpha(\text{HCO}^+)$ – скорость рекомбинации HCO^+ на электронах, член $k_g X_g$ описывает рекомбинацию на отрицательно заряженных пылинках (можно пренебречь).

Оценку содержания HCO^+ лучше проводить по наблюдениям редких изотопов, поскольку оптическая толщина в линиях основного изотопа велика. Нами проделаны такие оценки для 5-и областей образования массивных звезд по данным наших наблюдений H^{13}CO^+ . На этой основе сделаны оценки степени ионизации. Они показывают, что в большинстве случаев степень ионизации в 2-3 раза возрастает в направлении массивных звезд большой светимости. Необходимо отметить, что это относится к величинам, усредненным вдоль луча зрения и по диаграмме направленности антенны, так что увеличение этого параметра вблизи звезды может быть значительно больше.

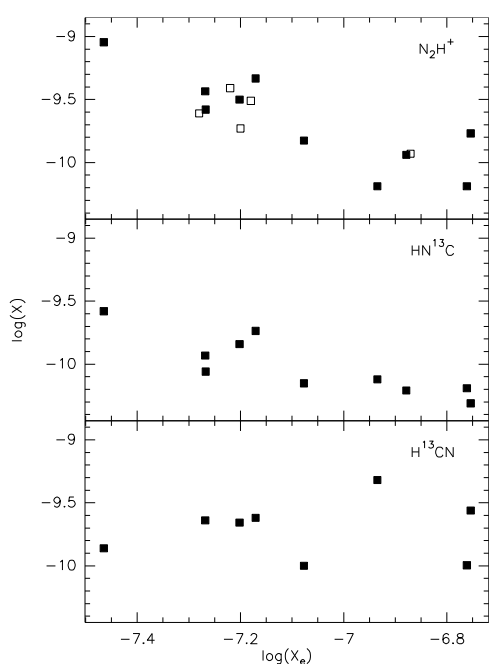


Рис. 1

Одной из причин дополнительной ионизации может быть мелкомасштабная фрагментарная структура этих объектов. Известно, что в этом случае УФ излучение может проникать значительно глубже в толщу облака (например, Bethell, Zweibel & Li 2007, ApJ, 667, 275). Тот факт, что Bergin et al. (1999) не зафиксировали заметных вариаций степени ионизации, может объясняться недостаточной светимостью звезд в исследовавшихся ими объектах.

Анализ корреляций между содержанием различных молекул и степенью ионизации показал, что относительная концентрация N_2H^+ и HNC заметно убывает с ростом X_e (рис. 1). В то же время содержание таких молекул, как HCN и CS , остается примерно постоянным. Таким образом, вероятно, именно этим фактором определяется наблюдаемая химическая дифференциация молекул в областях образования массивных звезд.

Публикации

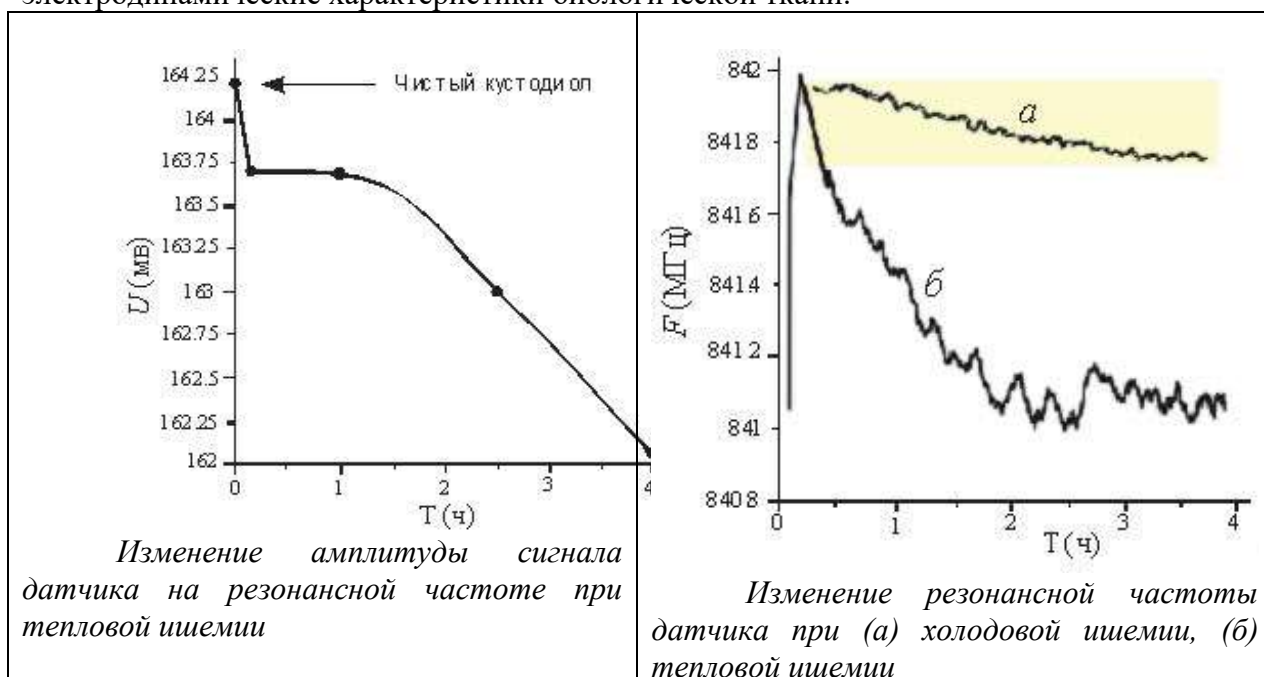
1. Pirogov L., Zinchenko I., Caselli P., Johansson L. E. B. Chemical differentiation in regions of high-mass star formation. CS, dust, and N_2H^+ in southern sources. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 461, pp.523-535 (2007)
2. Zinchenko I., Caselli P., Pirogov L. Chemical differentiation in regions of high-mass star formation - II. Molecular multiline and dust continuum studies of selected objects. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 395, pp. 2234-2247 (2009)

1.9. На основе разработанных контактных резонансных датчиков СВЧ диапазона создан диагностический комплекс для экспресс-анализа жизнеспособности органов, подготовленных к трансплантации. Разработаны методики, позволяющие оценивать жизнеспособность трансплантата, а также характеристик консервирующей жидкости (кустодиола), меняющихся в результате распада клеток находящегося в ней органа, подготовленного к трансплантации. Использование данного комплекса позволит выполнять анализ жизнеспособности трансплантатов в реальном времени.

Авторы: А.В. Костров, А.В. Стриковский, Д.В. Янин, В.Е. Загайнов, С.А. Васенин

Аннотация. Измерение электродинамических параметров биологических тканей представляет значительный интерес в разнообразных медицинских приложениях. Патологические и физиологические процессы в организме человека, как правило, сопровождаются изменением электродинамических параметров биологических тканей. Данное обстоятельство можно использовать при диагностике патологий, слабо различимых с помощью рентгеновского излучения и ультразвука.

Настоящая работа посвящена развитию методов исследования внутренней структуры биологических объектов без нарушения их целостности на основе резонансного ближнепольного зондирования. В качестве зонда используется резонатор на отрезке двухпроводной линии. При сканировании вдоль поверхности исследуемого объекта датчик реагирует на изменение диэлектрической проницаемости и проводимости на глубине порядка расстояния между проводниками длинной линии, которая является резонатором, что позволяет фиксировать неоднородность и определять электродинамические характеристики биологической ткани.



Кроме зонда, контактирующего с исследуемой тканью, на базе резонансного контактного датчика, был изготовлен и опробован датчик, реагирующий на малые добавки, появляющиеся при распаде клетки в консервирующей жидкости, промывающей орган, подготовленный к трансплантации, находящийся в критическом состоянии. С целью обнаружения продуктов распада клеток в жидкости, орган, находящийся в критическом состоянии, подключался к помпе, прокачивающей кустодиол по замкнутому циклу. Через определенные промежутки времени, производился забор образца консерванта. Данный эксперимент проводился с целью установления связи электродинамических характеристик (зависящих от концентрации продуктов распада клеток органа, подготовленного к трансплантации) промывающей жидкости со степенью жизнеспособности органа.



Внешний вид макета измерительного комплекса.

Результаты, полученные при измерении электродинамических параметров паренхимы контактным методом, и при измерении малых добавок продуктов распада клеток в консервирующей жидкости хорошо совпадают.

Публикации

1. В.Е. Загайнов, С.А. Васенин, Н.А. Дружкова, Г.Г. Горохов, В.А. Бельский, Н.В. Заречнова, А.В. Костров, А.В. Стриковский, Д.В. Янин. Экспресс-метод оценки жизнеспособности почечного трансплантата в эксперименте. Труды международной конференции «Клиническая трансплантология органов (актуальные вопросы)», Москва, 26-27 сентября 2007 г., с.139-141
2. А.В. Костров, А.В. Стриковский, Д.В. Янин, В.Е. Загайнов, С.А. Васенин, И.Н. Дружкова, Г.А. Пантелеева, З.В. Давоян. Исследование электродинамических параметров биологических тканей. Альманах клинической медицины, Т.17, №2, с.96-99 (2008)
3. С.А. Васенин, И.Н. Дружкова, А.В. Костров, А.В. Стриковский, Д.В. Янин, В.Е. Загайнов. Оценка жизнеспособности почечного трансплантата радиофизическими методами в эксперименте. Медицинский альманах, №5, с.53-54 (2008)
4. А.В. Костров, А.В. Стриковский, Д.В. Янин, В.Е. Загайнов, С.А. Васенин, И.Н. Дружкова, Г.А. Пантелеева, З.В. Давоян. Исследование электродинамических параметров биологических тканей. III Троицкая конференция «Медицинская физика и инновации в медицине», г. Троицк, 3-6 июня 2008 г.

1.10. Предложен новый подход к определению размерности вложения - ключевой характеристики реконструкции динамической системы по зашумленному временному ряду. Подход основан на построении глобальной модели реконструируемой системы в форме искусственной нейронной сети. Как размерность вложения, так и оптимальное число нейронов выбираются в соответствии с требованием наименьшей длины описания данных моделью. С помощью временных рядов, сгенерированных компьютерными и реальными системами, продемонстрировано, что новый подход позволяет определить размерность вложения при уровне шума, многократно (на порядок и более) превышающем величину, предельную для существующих методов. Это делает его эффективным инструментом реконструкции широкого круга динамических систем различной природы.

Авторы: Я.И.Мольков, Д.М.Мухин, Е.М.Лоскутов, А.М.Фейгин (ИПФ РАН), Г.А.Фиделин (ННГУ)

Аннотация. Несмотря на большое число работ, посвященных методам реконструкции динамических систем по временным рядам, такие методы чрезвычайно редко удавалось применить к экспериментально полученным «природным» данным. Одной из причин является то, что экспериментальные ряды, как правило, содержат шумовую компоненту, вообще говоря, неизвестной природы. Как правило, каждый из предложенных к настоящему времени методов такой реконструкции включает в себя два основных шага: реконструкцию области фазового пространства, в которой система эволюционирует, и построение модели, воспроизводящей поведение системы в этой области фазового пространства. Восстановление фазовых переменных производится в пространстве некоторой размерности, называемой размерностью вложения, которую предпочтительно выбирать минимально возможной. В присутствии шума существующие методики не в состоянии указать минимальную размерность вложения даже в том случае, когда есть основания считать наблюдаемый процесс продуктом эволюции детерминированной динамической системы.

Принципиальной особенностью второго шага – процедуры построения модели по зашумленному ВР – является его некорректность: всегда имеется бесконечное число решений, аппроксимирующих наблюдаемые данные с наперед заданной точностью. При этом интуитивно ясно, что для большинства приложений модель будет тем лучше, чем она проще. В качестве меры такой простоты может использоваться длина описания (дескриптивная длина) [1], являющаяся суммарной информацией, необходимой для передачи данных с использованием модели. Результатом построения модели является отыскание функциональной связи между отсчетами, что позволяет вместо множества отсчетов передавать только параметры этой связи, а также поправки, которые позволяют восстановить отсчеты принимающей стороной с заданной точностью. Следовательно, длина описания представляет собой сумму информации, необходимой для передачи этих поправок, и информации, необходимой для передачи параметров модели. Принцип минимальности длин описания предполагает, что лучшей является та модель, которая отвечает меньшей дескриптивной длине. Это, как продемонстрировано в работе [2], дает эффективный инструмент для выбора *технических* параметров модели, в том числе, выбора оптимального числа таких параметров.

Мы использовали принцип минимальной дескриптивной длины (МДД) для определения *размерности* вложения [3]. С этой целью использовался универсальный вид модели оператора эволюции системы в виде искусственной нейронной сети, включающий размерность вложения как параметр. Было получено выражение для длины описания, учитывающее априорные ограничения, накладываемые на параметры модели, и разработан метод ее минимизации.

Разработанный метод был применен как к модельным, так и к реальным данным. В качестве модельных данных использовались временные ряды системы Лоренца и системы Маккея-Гласса (система с запаздыванием), к которым добавлялся измерительный шум. Метод позволил правильно определить минимальную размерность вложения при уровне шума до 20%, тогда как известные методы определения размерности (метод фальшивых соседей, расчет зависимостей корреляционного интеграла от масштаба и др.) оказались не эффективными. Не эффективными в рассмотренных ситуациях оказались и широко известные информационные критерии оценки оптимального числа параметров, такие как критерий Акаике [4] и байесов информационный критерий [5]. Далее, нами были рассмотрены результаты эксперимента [6], в котором исследовались локомоторные движения людей под влиянием стимулирующего сигнала. Размерность вложения, равная 7, полученная с помощью принципа МДД по измеренному в эксперименте временному ряду величины угла коленного сустава, хорошо согласуется с результатами

феноменологического моделирования наблюдаемых в данной системе режимов поведения, полученными в работе [7]. Показано, что традиционно используемые для оценки размерности методы не дают результата в описанном примере вследствие высокого уровня шума измерений (относительная величина шума, оцененная по величине среднеквадратичной невязки в процессе применения метода МДД, равнялась 15%).

Таким образом, разработанный метод оценки минимальной размерности вложения динамической системы по наблюдаемому временному ряду оказывается существенно более грубым по отношению к величине шума, чем существующие методы, и может с успехом применяться при восстановлении динамических систем различной природы.

Литература

1. K. Judd and A. Mees, *Physica D* **82**, 426 (1995)
2. Z. Yi and M. Small, *IEEE Trans. Circuits Syst., I: Regul. Pap.* **53**, 722 (2006)
3. Ya.I. Molkov, D.N. Mukhin, E.M. Loskutov, A.M. Feigin and G.A. Fidelin. *Physical Review E*, 2009, 80, 046207
4. H. Akaike, *IEEE Trans. Autom. Control* **19**, 716 (1974)
5. G. E. Schwarz, *Ann. Stat.* **6**, 461 (1978)
6. V. Gurfinkel, Y. Levik, O. Kazennikov, and V. Selionov, *Eur. J. Neurosci.* **10**, 1608 (1998)
7. A. K. Kozlov, M. M. Sushchik, Ya. I. Molkov, and A. S. Kuznetsov, *Int. J. Bifurcation Chaos Appl. Sci. Eng.* **9**, 2271 (1999)

Публикации

1. Ya.I. Molkov, D.N. Mukhin, E.M. Loskutov, A.M. Feigin and G.A. Fidelin. Using the minimum description length principle for global reconstruction of dynamic systems from noisy time series. *Physical Review E*, 2009, 80, 046207.

1.11. Предложены и реализованы методы подавления одностороннего мультипакторного разряда, возникающего в неоднородных СВЧ полях высокой интенсивности на поверхности диэлектрических материалов в вакууме. Полученные результаты важны для разработки выходных окон мощных СВЧ генераторов, ускоряющих диэлектрических структур электрон-позитронных ускорителей и компрессоров СВЧ импульсов.

Авторы: А.Л. Вихарев, О.А. Иванов, Исаев В.А., Лобаев М.А. (ИПФ РАН)

Аннотация. В настоящее время мультипакторный (вторично эмиссионный) разряд рассматривается как крайне нежелательное явление, препятствующее генерации и транспортировке мощного СВЧ излучения. Поэтому изучение условий возникновения и подавления мультипактора важно для разработки выходных окон мощных СВЧ приборов, ускоряющих диэлектрических структур электрон-позитронных ускорителей, и компрессоров СВЧ импульсов.

Представлены результаты экспериментального исследования мультипакторного разряда, возникающего в неоднородных СВЧ полях на поверхности диэлектрических окон в вакууме. Эксперименты проводились при высоких значениях напряженности электрического поля $E \geq 30$ кВ/см, соответствующих плотности потока мощности 2-3 МВт/см². Определены пороги возникновения и поддержания разряда в зависимости от рода материала (кварц, CVD алмаз, LiF, тефлон) и шероховатости поверхности.

Впервые экспериментально показано, что существенное влияние на пороговые характеристики разряда оказывает величина и направление поперечной силы, возникающей в неоднородных электромагнитных полях вблизи поверхности диэлектрика

за счет градиента высокочастотного потенциала. В результате развитие мультипактора становится возможным и при отсутствии внешних статических полей, возвращающих эмитированные электроны к поверхности диэлектрика.

Обнаружено, что внешнее постоянное электрическое поле, отталкивающее электроны от поверхности приводит к существенному увеличению порога пробоя, а притягивающее к его понижению. Таким образом, экспериментально показано, что можно эффективно управлять мультипакторным разрядом, подавляя или иницируя его, с помощью изменения конфигурации электромагнитного поля или величины и направления внешнего постоянного электрического поля вблизи поверхности диэлектрика.

Установлено, что в резонансной системе возможно стационарное поддержание мультипактора без его перерастания в стадию СВЧ пробоя десорбированного с поверхности газа. Обнаружено, что при длительном воздействии разряда на поверхности диэлектриков осаждается тонкая углеродосодержащая пленка, приводящая к возрастанию порога пробоя. Этот эффект может быть использован, например, для нанесения тонких покрытий на поверхность диэлектрических материалов.

Публикации

1. Lobaev M.A., Ivanov O.A., Isaev V.A. Vikharev A.L. Multipactor discharge on a dielectric surface in microwave cavity. //Proceedings of the 7th International Workshop "Strong microwaves: sources and applications." Ed. A.G. Litvak, Nizhny Novgorod, 640-644, (2009)
2. Лобаев М.А., Иванов О.А., Исаев В.А., Вихарев А.Л., "Исследование влияния неоднородности СВЧ поля на порог мультипакторного разряда на диэлектрике" //Письма в ЖТФ, 2009, т.35., вып.23., с.9-16
3. O.A. Ivanov, M.A. Lobaev, V.A. Isaev, A.L. Vikharev, Suppressing and Initiation of Multipactor Discharge on a Dielectric by an External DC Bias //Phys. Rev. ST Accel.&Beams, 12, 1f11952z, (2009), (принята к печати)
4. О.А. Иванов, М.А. Лобаев, В.А. Исаев, А.Л. Вихарев, Экспериментальное исследование мультипакторного разряда на поверхности диэлектриков в высокодобротном СВЧ резонаторе // Физика плазмы, (принята к печати)

1.12. На основе мазера на свободных электронах (МСЭ) с частотой излучения 30 ГГц, мощностью 20 МВт, длительностью импульсов 200 нс и частотой следования импульсов до 1 Гц создан стенд для исследования свойств материалов в суперколлайдерах нового поколения. В тестовом резонаторе, моделирующем тепловой режим высокоградиентных ускоряющих структур, проведены эксперименты по исследованию тепловой усталости меди при многократном воздействии импульсов МСЭ. Показано, что в результате $6 \cdot 10^4$ циклов нагрева поверхности меди на 200-220°C за импульс возникает ее существенная деградация, сопровождающаяся развитием СВЧ-пробоев.

Авторы: А.А.Вихарев, Н.С.Гинзбург, Н.И.Зайцев, С.В.Кузиков, Н.Ю.Песков, А.С.Сергеев (ИПФ РАН), А.К.Каминский, Э.А.Перельштейн, С.Н.Седых (ОИЯИ, Дубна)

Аннотация. Высокоэффективный узкополосный МСЭ-генератор реализован в совместных экспериментах ОИЯИ и ИПФ РАН. МСЭ запитывается линейным индукционным ускорителем ЛИУ-3000 (ОИЯИ, Дубна), формирующим релятивистский электронный пучок 0.8 МэВ / 200 А / 200 нс, и генерирует 30-ГГц импульсы с мощностью излучения 20 МВт, длительностью 200 нс и частотой следования импульсов до 1 Гц. Ширина спектра излучаемых импульсов составляет 6 - 7 МГц, что близко к естественной

ширине линии генератора. Высокая эффективность и узкий частотный спектр достигнуты за счет использования режима обратного ведущего поля, обеспечивающего высокое качество формирования винтового релятивистского электронного пучка, и нового типа брэгговского резонатора – резонатора со скачком фазы гофрировки в пространстве взаимодействия, обладающего высокими селективными свойствами.

Достигнутые уровень мощности и стабильности режима одномодовой одночастотной генерации позволили реализовать на базе МСЭ экспериментальный стенд для исследования эффекта деградации меди под воздействием мощных СВЧ-импульсов. Необходимая для создания ускорителей нового поколения, разрабатываемых в ускорительных центрах CLIC (ЦЕРН) и SLAC (Станфордский университет), экспериментальная информация о поведении материалов (металлов и диэлектриков) под воздействием сильных электромагнитных миллиметрового диапазона является в настоящее время весьма неполной. Разработан тестовый резонатор, моделирующий температурный режим ускоряющих структур проекта CLIC (ЦЕРН). Возможность запитки высокодобротной нагрузки излучением МСЭ продемонстрирована в нестационарном моделировании и подтверждена экспериментально. Измеренные в «холодных» и «горячих» тестах электродинамические характеристики стенда близки к расчетным. Работоспособность стенда и стабильность параметров излучения МСЭ в настоящий момент продемонстрирована в статистике $\sim 10^5$ импульсов.

Проведены эксперименты по исследованию тепловой усталости меди при многократном воздействии импульсов МСЭ. Прослежена динамика разрушения поверхности при различных температурах нагрева в зависимости от числа ВЧ-импульсов. Показано, что в результате $6 \cdot 10^4$ циклов нагрева поверхности меди на $200-220^\circ\text{C}$ за импульс возникает ее существенная деградация, сопровождающаяся развитием СВЧ-пробоев.

Публикации

1. А.В.Елжов, Н.С.Гинзбург, Н.И.Зайцев, И.Н.Иванов, Е.В.Иляков, А.К.Каминский, В.В.Косухин, С.В.Кузиков, И.С.Кулагин, Н.Ю.Песков, Э.А.Перельштейн, М.И.Петелин, С.Н.Седых, А.П.Сергеев, А.С.Сергеев, И.В.Сырачев. Стенд для исследования ресурса имитатора ускоряющей структуры коллайдера CLIC при воздействии мощного импульсного излучения на частоте 30 ГГц. Письма в Журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра», т.2, №3 (126), с.102-105. 2005.
2. Н.С.Гинзбург, А.К.Каминский, С.В.Кузиков, Э.А.Перельштейн, Н.Ю.Песков, С.Н.Седых, А.П.Сергеев, А.С.Сергеев. О возможности использования МСЭ с брэгговским резонатором для тестирования высокодобротных резонансных структур. ЖТФ, т.76, №7, с.69-75, 2006.
3. А.К.Каминский, Э.А.Перельштейн С.Н.Седых, Н.С.Гинзбург, Н.И.Зайцев, С.В.Кузиков, Н.Ю.Песков, А.С.Сергеев. Демонстрация работы мощного 30-ГГц МСЭ на резонансную нагрузку. Письма в ЖТФ (в печати).
4. A.K.Kaminsky, E.A.Perelstein, S.N.Sedykh, N.S.Ginzburg, S.V.Kuzikov, N.Yu.Peskov, A.S.Sergeev, A.A.Vikharev. Observation of copper surface degradation caused by 30 GHz pulse heating based on powerful FEM. Appl. Phys. Lett. (in press).

1.13. Показано, что в солнечной короне существует особый класс магнитных петель, собственная звуковая частота которых находится в резонансе с частотой 5-минутных фотосферных осцилляций скорости. Это приводит к параметрическому возбуждению интенсивных звуковых колебаний в таких петлях и к их нагреву до температур (3-6) МК, существенно превышающих температуру окружающей корональной

плазмы. Показано, что проявлением этого нагрева в короне являются квазистационарные рентгеновские петли, длина которых $(0,2-2) \times 10^{10}$ см удовлетворяет условию параметрического резонанса.

Авторы: В.В. Зайцев (ИПФ РАН), К.Г. Кислякова (ННГУ)

Аннотация. Рассмотрен нагрев плазмы в корональных магнитных петлях, обусловленный диссипацией собственных звуковых колебаний петли как МГД-резонатора, возбуждаемых при параметрическом резонансе этих колебаний с 5-минутными осцилляциями скорости фотосферной конвекции. По данным об амплитуде 5-минутных осцилляций определена энергия возбуждаемых звуковых колебаний в магнитной петле, скорость диссипации этих колебаний и соответствующая функция нагрева плазмы внутри петли. Вычислена максимальная температура в вершине петли и ее зависимость от скорости фотосферных осцилляций, длины петли и величины электрического тока в петле. Показано, что рассмотренный механизм может объяснить происхождение горячих рентгеновских петель с температурами 3-6 МК, наблюдавшихся в солнечной короне спутником *Yohkoh*. Длина этих петель является «резонансной» для возбуждения звуковых колебаний 5-минутными фотосферными осцилляциями. Обсуждается также возможное приложение рассмотренного механизма нагрева для рентгеновских петель на звездах поздних спектральных классов.

Публикации

1. В.В. Зайцев, А.В. Степанов, Успехи физических наук, 2008, т. 90, №11, с.1165-1204
2. В.В. Зайцев, К.Г. Кислякова, *Астрономический журнал*, 2009, принята к публикации.

1.14. Разработана серия высокостабильных охлаждаемых без жидких криоагентов фотометрических видеокамер для оптической астрономии с применением различных современных приемников изображения видимого диапазона.

Разработанные камеры построены по принципу максимальной унификации механических и электронных узлов в сочетании с высоким качеством регистрации слабых изображений. Они обеспечивают возможность их эффективной инновационной реализации в серийном производстве, как для задач оптической астрономии, так и других областей науки и техники. Разработанный набор камер представляет собой универсальный типоряд изделий новейшего класса, впервые созданный в РФ.

Авторы: Вдовин В.Ф., Густяков В.Н., Коротаев Д.В., Мамаев Ю.А., Мансфельд М.А., Перминов В.Г. (ИПФ РАН); Ардиланов В.М., Афанасьева И.В., Борисенко А.Н., Маркелов С.В., Мурзин В.М., Притыченко М.А. (САО РАН)

Аннотация. Разработана серия высокостабильных охлаждаемых без жидких криоагентов («сухих») фотометрических видеокамер для оптической астрономии с применением различных современных приемников изображения видимого диапазона:

- камера для составных (мозаичных) приемников с большими размерами фоточувствительной поверхности с охлаждением рефрижераторной системой замкнутого цикла дроссельного типа;
- камера для средне- и малоформатных монолитных ПЗС-матриц также с применением рефрижератора замкнутого цикла;
- камера для крупно- и малоформатных ПЗС-матриц с термоэлектрическим охлаждением.

Отличительные особенности камер заключаются в следующем:

- мозаичная камера позволяет использовать сборки стыкуемых ПЗС-матриц типа CCD42-80, CCD42-90 или иных перспективных приемников с общим форматом от 8000 x 8000 до 16000 x 16000 пикселей с высокой точностью юстировки их плоскостности и долговременной стабильности ориентации в фокальной плоскости светосильных оптических систем; неоднородность температуры охлаждения такого составного приемника изображения в диапазоне -1000С - -1200С составляет около 0.10С по всей поверхности; скорость считывания всего приемника обеспечивается в диапазоне от 50 кГц (малошумящий режим с шумом считывания около 3 электрона/пиксел) до 3МГц;
- второй тип камеры предназначен как для классических среднеформатных ПЗС-матриц типа CCD42-40 с числом пикселей 2048 x 2048, так и для приборов типа EMCCD с числом пикселей 512 x 512 и более, которые широко применяются в спеклинтерферометрии и адаптивных оптических системах в режиме регистрации одноэлектронных событий, в камере обеспечена скорость считывания 10-16 Мпикселей/с и охлаждение до -1300С;
- камеры с термоэлектрическим охлаждением до -400С предназначены для реализации ПЗС-систем общего назначения на основе ПЗС-матриц с форматом от 4096 x 4096 пикселей для решения обзорных наблюдательных задач, так и вплоть до использования современных малоформатных pnCCD, позволяющих решать проблемы построения адаптивных оптических систем.



1.15. Для генерации когерентного излучения мультимегаваттного уровня мощности в коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметровом диапазонах в лазерах на свободных электронах (МСЭ) предложено использовать брэгговские резонаторы, основанные на связи бегущих и квазикритических волн. Наличие в цепи обратной связи квазикритических волн позволяет улучшить по сравнению с традиционными аналогами селективные характеристики резонаторов и обеспечить стабильный режим одномодовой генерации при поперечном размере пространства взаимодействия $\sim 10 - 20$ длин волн, достаточной для транспортировки интенсивных релятивистских электронных пучков. В качестве демонстрационного эксперимента, подтверждающего работоспособность резонатора нового типа, реализован узкополосный МСЭ 8-мм диапазона длин волн с мощностью на уровне 10 МВт.

Авторы: Н.С.Гинзбург, В.Ю.Заславский, И.В.Зотова, А.М.Малкин, Н.Ю.Песков, А.С.Сергеев (ИПФ РАН), А.К.Каминский, Э.А.Перельштейн, С.Н.Седых (ОИЯИ, Дубна)

Аннотация. Брэгговские резонаторы на основе слабоффрированных волноводов позволили реализовать мощные узкополосные МСЭ-генераторы в длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн. В традиционном варианте МСЭ, как и в получивших широкое применение лазерах с распределенной обратной связью, имеет место связь бегущих навстречу друг другу волн, обладающих большой групповой

скоростью. Однако в МСЭ уже при радиусе волноводов порядка длины волны возникают перескоки частоты генерации, обусловленные связью на гофрировке различных пар волноводных мод. Поэтому для продвижения МСЭ в коротковолновую часть миллиметрового и субмиллиметровый диапазоны требуются более селективные резонаторы. Для этой цели могут быть использованы модифицированные брэгговские резонаторы, основанные на связи бегущих и квазикритических волн. Оптимальной представляется двухзеркальная схема, в которой модифицированное брэгговское зеркало расположено на входе пространства взаимодействия, а на выходе используется традиционная брэгговская структура. Синхронная с электронным потоком попутная бегущая волна в модифицированной структуре связана с квазикритической волной, обеспечивающей эффективную селекцию мод по поперечному индексу. Усиление синхронной волны в основном имеет место после входного зеркала в регулярной части резонатора. Небольших отражений усиленного излучения от традиционного брэгговского зеркала оказывается достаточно для самовозбуждения автоколебаний. Вовлечение в цепь обратной связи критической моды позволяет значительно разредить спектр мод резонатора, поскольку частотный интервал между такими модами при большой сверхразмерности значительно превышает интервал между модами, формируемыми связью на брэгговской структуре параксиальных волн. Секционирование пространства взаимодействия позволяет обеспечить невысокий уровень квазикритической моды и, таким образом, контролировать омические потери.

Согласно моделированию, при переходе к планарной геометрии модифицированные брэгговские структуры сохраняют селективные свойства при поперечных размерах до 10-20 длин волн, и потому они перспективны для мощных длинноимпульсных МСЭ в коротковолновых диапазонах. Работоспособность резонатора нового типа продемонстрирована в МСЭ 8-мм диапазона на базе ускорителя ЛИУ-3000 (ОИЯИ, Дубна). Реализован генератор с резонатором, состоящим из входного узкополосного (полоса отражения 100 - 150 МГц) модифицированного брэгговского зеркала, обеспечивавшего отражение волны $H_{1,1}$ в волну того же типа через возбуждение квазикритической волны $H_{1,2}$, и выходного традиционного (полоса 1 - 1.5 ГГц) брэгговского зеркала, связывающего встречные волны одного ($H_{1,1}$) типа, с небольшим коэффициентом отражения. В расчетной области параметров получена мощность излучения ~ 10 МВт. При изменении амплитуды ондуляторного поля возбуждение рабочей моды резонатора наблюдалось во всей полосе самовозбуждения генератора, что демонстрирует стабильность рабочего режима к изменению параметров пучка.

Публикации

1. N.S.Ginzburg, A.M.Malkin, N.Yu.Peskov, A.S.Sergeev, V.Yu.Zaslavsky. *Free electron lasers with terahertz band Bragg reflectors*. Physical Review ST-AB, 2009, vol.12, p.060702.
2. N.S.Ginzburg, A.M.Malkin, N.Yu.Peskov, A.S.Sergeev, V.Yu.Zaslavsky, K.Kamada, Y.Soga. *Tunable terahertz band planar Bragg reflectors*. Applied Physics Letters, 2009, vol.95, p.043504.
3. Н.С.Гинзбург, В.Ю.Заславский, И.В.Зотова, А.К.Каминский, А.М.Малкин, Н.Ю.Песков, Э.А.Перельштейн, С.Н.Седых, А.С.Сергеев. *МСЭ с высокоселективным брэгговским резонатором, основанным на связи бегущих и квазикритических волн*. Письма в ЖТФ (в печати).

1.16. Предложен высокоэффективный механизм ускорения электронов в радиационных поясах Земли, обусловленный циклотронным взаимодействием электронов со свистовыми волнами (вистлерами) с изменяющейся частотой в условиях нелинейного захвата электронов полем волны. Показано, что он является эффективным каналом

передачи энергии от электронов с энергиями 10–100 кэВ, генерирующих свистовые волны в магнитосфере Земли (хоровые ОНЧ излучения), к электронам с более высокими энергиями. За один проход волнового пакета в области ускорения электронами, находящимися в режиме захвата, может быть поглощена значительная доля (десятки процентов) энергии волнового пакета. Нелинейное ускорение не только является эффективным механизмом ускорения электронов, но и может приводить к сильному нелинейному затуханию хоровых излучений.

Авторы: А. Г. Демехов, В. Ю. Трахтенгерц

Аннотация. Предложен и детально исследован эффективный механизм ускорения электронов в магнитосфере Земли до релятивистских энергий при их циклотронном взаимодействии со свистовыми волнами, наблюдаемыми в виде дискретных ОНЧ излучений, в условиях нелинейного захвата электронов полем волны. Ключевым фактором, определяющим темп ускорения, является переменность частоты волнового пакета во времени и пространстве, что характерно для свистящих атмосфериков и хоровых ОНЧ излучений, являющихся основными видами дискретных ОНЧ излучений в магнитосфере. Определены условия реализации и основные параметры данного механизма ускорения. Показано, что он является эффективным каналом передачи энергии от электронов с энергиями 10–100 кэВ, генерирующих хоровые ОНЧ излучения в магнитосфере Земли, к электронам с более высокими энергиями. Набор энергии за один акт взаимодействия электрона с пакетом свистовых волн, имеющим типичные параметры элемента хоровых излучений, может составлять десятки кэВ. Эта величина на порядок превосходит эффективность стохастического ускорения, имеющего место при взаимодействии в отсутствие захвата частиц полем волны. Показано, что за один проход хорового элемента в области ускорения электронами, ускоряемыми в режиме захвата, может быть поглощена значительная доля (десятки процентов) энергии хорового элемента. Таким образом, нелинейное ускорение не только является эффективным механизмом ускорения электронов, но и может приводить к сильному нелинейному затуханию хоровых излучений.

Публикации

1. Trakhtengerts V. Y., Rycroft M. J., Nunn D., Demekhov A. G. Cyclotron acceleration of radiation belt electrons by whistlers // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, No.A3. 1138, doi:10.1029/2002JA009559.
2. Демехов А. Г., Трахтенгерц В. Ю., Райкрофт М., Нанн Д. Ускорение электронов в магнитосфере свистовыми волнами переменной частоты // *Геомагнетизм и аэрномия.* 2006. Т. 46, № 6. С.751–756.
3. Демехов А. Г., Трахтенгерц В. Ю., Райкрофт М., Нанн Д. Эффективность ускорения электронов в магнитосфере свистовыми волнами переменной частоты // *Геомагнетизм и аэрномия.* 2009. Т. 49, № 1. С.28–33.

1.17. Продемонстрирована важность учета абберационных эффектов для моделирования профилей энерговклада в установках масштаба ИТЭР при решении задач стабилизации МГД неустойчивостей плазменного шнура методом электронно-циклотронного нагрева плазмы, приводящих к более жестким требованиям к необходимой мощности системы электронно-циклотронного нагрева по сравнению с результатами стандартных расчетов без учета аббераций. Разработан универсальный численный код для расчета квазиоптических волновых пучков, учитывающий пространственную дисперсию,

резонансное поглощение и абберации теплой магнитоактивной плазмы. Найдены новые аналитические решения волнового уравнения, описывающие распространение и поглощение излучения в условиях электронно-циклотронного резонанса, с помощью которых проведена верификация кода.

Авторы: А.А. Балакин, М.А. Балакина, А.Г. Шалашов

Аннотация. Традиционно считается, что влияние абберационных эффектов при распространении волновых СВЧ пучков в термоядерной плазме мало. Соответственно, при численном моделировании волновые пучки могут быть с достаточной точностью описаны либо в рамках безабберационного квазиоптического приближения, либо в рамках геометрической оптики. Существует возможность непосредственного расчета волновых полей путем решения полной системы уравнений Максвелла, однако мощности современных компьютеров все еще недостаточно для проведения подобных расчетов для современных крупномасштабных тороидальных установок и строящегося токамака ИТЭР.

В ИПФ РАН разработан универсальный численный код для расчета квазиоптических волновых пучков в термоядерной плазме, учитывающий пространственную дисперсию и резонансное поглощение среды. Данный код с одной стороны достаточно быстр для трехмерного моделирования распространения волновых пучков в условиях реальных установок, а с другой стороны включает корректный учет аббераций, возникающих вследствие пространственной дисперсии и неоднородности среды. Код позволил провести детальное исследование роли абберационных эффектов при распространении и поглощении квазиоптических волновых пучков в теплой магнитоактивной плазме. Расчеты сценариев нагрева и стабилизации неустойчивостей в токамаках ИТЭР и TEXTOR показали значительное увеличение ширины профиля энерговклада и, соответственно, требуемой мощности греющего излучения, по сравнению со стандартными расчетами с помощью безабберационных кодов типа TORBEAM или GREY. Найденное увеличение ширины профиля энерговклада составляет от 30% до 100% раз в зависимости от сценария.

Столь значительное увеличение ширины профиля энерговклада в сравнении с традиционными расчетами вызвало естественное желание проверить правильность использованного квазиоптического подхода на модельной среде, допускающей точное аналитическое решение. Была выбрана среда с поглощением, линейно нарастающим вдоль одной координаты и пропорциональным второй производной поля от другой координаты. Такая среда соответствует электронно-циклотронному поглощению волнового пучка в периферийной области токамака. Путем сравнения аналитического, квазиоптического и безабберационного решений для ряда реальных установок было показано, что квазиоптическое и точное решение совпадают с точностью до 1-2%, а безабберационное решение дает значительно более узкий, до 20%, профиль энерговклада. Тем самым был подтвержден вывод о недостаточности безабберационного приближения и верифицированы развиваемый в ИПФ РАН квазиоптический подход и созданный на его основе код. Продемонстрирована важность учета абберационных эффектов для моделирования профилей энерговклада в установках масштаба ИТЭР при решении задач стабилизации МГД неустойчивостей плазменного шнура, приводящих к более жестким требованиям к необходимой мощности системы электронно-циклотронного нагрева по сравнению с результатами стандартных расчетов без учета аббераций.

Публикации

1. A.A.Balakin and O.Maj, Effects of aberration on paraxial wave beams: beam tracing versus quasi-optical solutions, Plasma Physics & Control.Fusion (направлена в печать).

2. A.A. Balakin, M.A. Balakina, E. Westerhof. ECRH power deposition from a quasi_optical point of view. Nuclear Fusion, v.48, 065003.
3. А.А. Балакин, М.А. Балакина, А.Г. Шалашов. К оценке роли дифракции при электронно-циклотронном поглощении в периферийных областях плазменного шнура // Физика плазмы. Т.33. Вып. 8. С. 729-737.

1.18. На основе разработанной аналитической модели, подтвержденной численным моделированием, найдены оптимальные условия для «самоинжекции» электронов в плазменную полость, формируемую в газе мощным лазерным импульсом или коротким сгустком релятивистских электронов. Показано, что поперечная пространственная модуляция плазменной полости и пучка самоинжектированных электронов для предельно короткого релятивистски сильного лазерного импульса может быть обусловлена изменением абсолютной фазы импульса при его распространении в плазме.

Авторы: И.Ю. Костюков, Е.Н. Неруш (ИПФ РАН), А. Пухов, В. Середов (Университет Дюссельдорфа, Германия)

Аннотация. В последнее время быстрое развитие лазерной физики и технологии привело к двум важным результатам: с одной стороны растет интенсивность лазерного излучения, с другой стороны становится возможной генерация все более коротких лазерных импульсов. Лазерное излучение сверхвысокой (более 10^{19} Вт/см²) в настоящее время успешно используется для ускорения заряженных частиц в плазме. Важным преимуществом данных методов является отсутствие внешнего инжектора, поскольку плазменные электроны захватываются в ускоряющую плазменную волну в результате «самоинжекции». При этом ток ускоренных электронов может более сотни килоампер, что значительно превышает ток в современных ускорителях высокой энергии. Самоинжекция является одним из ключевых механизмов плазменных ускорителей, в значительной степени влияющей на качество ускоренного электронного пучка. Для многочисленных приложений от рентгеновских лазеров до электрон-позитронных коллайдеров требуются высокое качество электронных пучков. До настоящего времени не существует детальной теории самоинжекции электронов, учитывающей многомерную конфигурацию взаимодействия. Недавно ускорение электронов сверхкороткими лазерными импульсами в плазме изучалось экспериментально. В экспериментах наблюдалась генерация моноэнергетического электронного сгустка, при этом, по сравнению со случаем использования длинного лазерного импульса, отсутствовали низкоэнергичные электроны с тепловым спектром, что очень важно для многих приложений.

Разработана аналитическая модель, описывающая самоинжекцию электронов в плазменную полость, возбуждаемую в сильно-нелинейном режиме мощным лазерным импульсом или коротким сгустком релятивистских электронов. В таком режиме давление лазерного излучения или заряд электронного сгустка выталкивают плазменные электроны из области взаимодействия, формируя плазменную полость - с гигантским ионным зарядом. Плазменные электроны могут быть захвачены в полость (самоинжекция) и ускорены до высоких энергий. Модель устанавливает условия для захвата электронов и позволяет вычислить сечение захвата электронов как функцию от параметров полости. Исследованы эффекты, связанные с абсолютной фазой, возникающие при взаимодействии релятивистски сильных предельно коротких (длительностью несколько лазерных периодов) лазерных импульсов с разреженной плазмой. Показано, что плазменная полость асимметрична, и её форма существенно зависит от абсолютной фазы лазерного импульса (разность фаз между несущей и огибающей импульса). При распространении лазерного импульса в плазме его абсолютная фаза изменяется, что приводит к

поперечным колебаниям полости. Кроме того, пучок захваченных электронов оказывается промодулированным в плоскости поляризации лазерного импульса. Для описания данных эффектов построена аналитическая модель, выходящая за рамки пондеромоторного приближения. Степень асимметрии полости и представлена как функция параметров лазерного импульса и плотности плазмы. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с результатами расчета трехмерным кодом, использующим метод частиц в ячейках.

Публикации

1. E.N. Nerush, I.Yu Kostyukov, "Carrier-Envelope Phase Effects in Plasma-Based Electron Acceleration with Few-Cycle Laser Pulses", Physical Review Letters, 2009, V. 103, Article no. 035001 . - P. 1-4.
2. I. Kostyukov, E. Nerush, A. Pukhov, V. Seredov "Electron Self-Injection in Multidimensional Relativistic-Plasma Wake Fields", Physical Review Letters, 2009, V. 103, Article no. 175003. - P. 1-4.

1.19. Разработан новый метод пассивной ассимиляции данных, существенно улучшающий краткосрочные прогнозы концентрации взвешенного вещества в атмосфере путем комбинации детерминистских прогнозов, вырабатываемых химическо-транспортной моделью, и результатов статистических моделей. Показано, что характерный масштаб пространственной репрезентативности комбинированных прогнозов в летних условиях почти в два раза превышает аналогичный масштаб в случае классических статистических прогнозов.

Авторы: И.Б. Коновалов (ИПФ РАН), M. Beekmann, A. Dutot, G. Foret (CNRS, Франция), F. Meleux (INERIS, Франция)

Аннотация. Концентрация мелкодисперсного взвешенного вещества является одним из важнейших показателей качества воздуха, для которого имеются критерии, установленные Всемирной организацией здравоохранения. Однако чрезвычайная сложность процессов, определяющих эволюцию взвешенного вещества в атмосфере, накладывает ограничения на качество существующих прогностических моделей.

С целью улучшения качества краткосрочных прогнозов взвешенного вещества разработан простой, но эффективный метод пассивной ассимиляции данных, основанный на статистической обработке детерминистских прогнозов, вырабатываемых химическо-транспортной моделью. Предложенная процедура фактически осуществляет комбинацию статистических и детерминистских прогнозов. Возможности такого подхода исследованы при использовании как линейных статистических моделей, так и нелинейных моделей на основе искусственных нейронных сетей, и данных регулярных измерений взвешенного вещества (PM₁₀) на 445 станциях наземного мониторинга в Европе. В работе использовалась современная химическо-транспортная модель CHIMERE, которая является основой функционирующей системы PREV'AIR для прогноза качества воздуха в Западной Европе.

Показано, что комбинированные прогнозы являются существенно лучшими по сравнению как с детерминистскими, так и с "классическими" статистическими прогнозами. В частности, увеличение коэффициента определенности (R^2) в случае комбинированных прогнозов на одни сутки вперед может достигать 85 процентов по сравнению со случаем детерминистских прогнозов и 35 процентов по сравнению со случаем стандартных статистических прогнозов. Использование данных сотен мониторов позволило впервые исследовать важный практический вопрос о пространственной

репрезентативности статистических и комбинированных прогнозов. Показано, что статистические прогнозы являются в среднем лучшими, чем детерминистские прогнозы, если расстояние от станции мониторинга, поставляющей данные для создания статистической модели, не превышает (в лучшей конфигурации) 400 км. Обнаружено, что в случае комбинированных прогнозов данный масштаб оказывается почти в два раза большим.

Подробное описание метода и результатов его апробирования представлено в работе [1]. Упрощенный вариант данного метода использовался также в работе [2] для улучшения расчетов концентрации PM_{10} в Москве. Практическую реализацию метода планируется осуществить как в рамках системы PREV'AIR, так и в рамках разрабатываемой в настоящее время (совместно с Гидрометцентром России) системы оценки и прогноза качества воздуха в Центрально-Европейском районе России.

Литература

1. Konovalov, I. B., M. Beekmann, F. Meleux, A. Dutot, G. Foret, Combining deterministic and statistical approaches for PM_{10} forecasting in Europe, Atmospheric Environment, doi:10.1016/j.atmosenv.2009.06.039, V. 43, Iss. 40, p. 6425-6434, 2009.
2. Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Артамонова А.А., Нахаев М.И., Лезина Е.А., Звягинцев А.М., Бикманн М., Наблюдаемая и рассчитанная изменчивость концентрации взвешенного вещества (PM_{10}) в Москве и Зеленограде, Метеорология и Гидрология (направлено в печать, 2009).

Публикации

1. Konovalov, I. B., M. Beekmann, F. Meleux, A. Dutot, G. Foret, Combining deterministic and statistical approaches for PM_{10} forecasting in Europe, Atmospheric Environment, doi:10.1016/j.atmosenv.2009.06.039, V. 43, Iss. 40, p. 6425-6434, 2009.

1.20. Исследованы явления преобразования спектра оптического излучения в процессах лазерно-кластерного взаимодействия. Показано, что ударное возбуждение собственных колебаний наноплазмы, образующейся при пробое атомного кластера ультракоротким лазерным импульсом, приводит к повышению энерговыклада в плазму и сильному сдвигу вверх частоты рассеиваемого излучения: ксеноновый кластер, ионизируемый одноцикловым импульсом инфракрасного диапазона (800 нм), переизлучает в основном как источник ультрафиолетового света (360 нм).

Авторы: А.М. Быстров, В.Б. Гильденбург

Аннотация. Быстрый прогресс современной лазерной техники, приведший к созданию мощных коротких импульсов оптического излучения, привлек в последние годы внимание исследователей к ряду новых, не изучавшихся ранее аспектов физики ионизационного взаимодействия излучения с веществом и стимулировал разработку ряда новых важных применений лазерной плазмы. Одним из таких аспектов является исследование резонансных явлений, существенно определяющих динамику мелкомасштабных плазменно-полевых структур, формируемых в процессе пробоя. В частности, при взаимодействии лазерных импульсов с «наноплазмой» ионизируемых или металлических атомных кластеров резонансные явления, обусловленные возбуждением собственных колебаний плазмы, могут обеспечить достижение гигантской концентрации энергии оптического поля и, как следствие – генерацию высокоэнергичных (субтермоядерных) и многозарядных ионов, а также эффективное преобразование частотного спектра падающего импульса (генерация высоких гармоник, ультрафиолетового и рентгеновского излучения). Использование этих явлений представляется также весьма перспективным в

связи с проблемами создания и диагностики различных наноструктурированных материалов с управляемыми оптическими свойствами.

Нами были исследованы игнорировавшиеся до недавнего времени особенности лазерно-кластерного взаимодействия, связанные с возбуждением собственных дипольных колебаний сферического атомного кластера в процессе его ионизации лазерным импульсом с длительностью порядка одного или нескольких периодов оптического поля. Было найдено, что быстрый рост плотности плазмы на начальной стадии ионизации приводит к генерации слабо затухающего поверхностного плазмона с собственной частотой, значительно превышающей несущую частоту лазерного импульса. Благодаря этому существенно возрастает время взаимодействия кластера с сильным полем, увеличивается энергия, отдаваемая плазме, и происходит кардинальная перестройка спектра рассеянного излучения: ксеноновый кластер, облучаемый одноцикловым импульсом ближне-инфракрасного диапазона (800 нм) рассеивает в основном как источник ультрафиолетового света (360 нм). Поскольку проблему генерации импульсов с длительностью около одного периода колебаний в настоящее время можно считать практически решенной, предсказанный эффект вполне доступен экспериментальному наблюдению и может быть использован для измерения параметров наноплазмы и диагностики быстрых процессов лазерно-кластерного взаимодействия.

Публикация

1. A.M. Bystrov and V.B. Gildenburg, Phys. Rev. Lett., 2009, v. 103, p. 083401.

1.21. Показана возможность существования и построена аналитическая теория самосогласованных стационарных токовых слоёв и трубок тока с локализованным магнитным полем в бесстолкновительной многокомпонентной плазме, в том числе релятивистской. Найденные нейтральные токовые структуры допускают произвольные функции распределения частиц по энергиям, широкий класс пространственных профилей и сравнимые плотности энергии магнитного поля и частиц. Соответствующие магнитостатические конфигурации, являясь локализованными в отличие от известных ранее токовых слоёв типа Харриса и филаментов типа Беннетта, позволяют систематически описывать различные уединённые токовые образования, возникающие в лабораторной и космической плазме под действием электромагнитных (лазерных) импульсов, ударных волн, джетов и других анизотропных факторов.

Авторы: В.В. Кочаровский, Вл.В. Кочаровский, В.Ю. Мартьянов

Аннотация. Известные нейтральные токовые слои Харриса и филаменты (пинчи) Беннетта с максвелловскими функциями распределения электронов и ионов, сдвинутыми по скорости относительно друг друга, широко используется при описании квазистатических конфигураций магнитного поля и тока в бесстолкновительной нерелятивистской плазме. Однако до сих пор класс аналитически рассматриваемых токовых конфигураций был невелик и совершенно недостаточен для описания возможных самосогласованных магнитостатических структур, образующихся в бесстолкновительной плазме в результате тех или иных динамических процессов, например, под действием электромагнитных импульсов, ударных волн или струйных выбросов плазмы (джетов). Действительно, в реальных уединённых токовых структурах и магнитостатической турбулентности функция распределения частиц не обязана быть максвелловской, профили плотности тока отнюдь не являются универсальными (типа Харриса или Беннетта), а нелокализованные магнитные поля, требующие нескомпенсированных токов, адекватны далеко не всем процессам в плазме.

Оказывается, что метод инвариантов движения частиц, разработанный авторами для рассматриваемой задачи, позволяет точно решить систему нелинейных кинетических уравнений и уравнений Максвелла и аналитически найти широкий класс плоско-слоистых и цилиндрически-симметричных стационарных токовых конфигураций, отвечающих локализованному магнитному полю (т.е. нулевому полному току) и допускающих разнообразные профили плотности тока и произвольные функции распределения частиц по энергии.

Найденные стационарные нейтральные конфигурации тока описываются известным в магнитной гидродинамике уравнением типа Грэда-Шафранова для векторного потенциала, создаваемого этим током. Для бесстолкновительной плазмы – релятивистской и нерелятивистской, как показали авторы, решения аналогичного уравнения задаются интегральными характеристиками функции распределения частиц посредством определённого потенциала Грэда-Шафранова, который удаётся явно вычислить с использованием тейлоровского разложения функций распределения частиц по инвариантам движения.

Для найденных самосогласованных структур в виде токовых слоёв и трубок тока характерна пространственная неоднородность анизотропии функции распределения частиц и возможность сравнимых значений плотностей энергии магнитного поля и частиц. Размеры токовых слоёв и трубок тока могут быть как меньше, так и значительно больше минимального гирорадиуса частиц плазмы, большинство которых в последнем случае является захваченными, т.е. их траектории не выходят за пределы структуры. В то же время самосогласованная функция распределения частиц может быть сильно анизотропной даже за пределами магнитостатической структуры, однако удаётся показать, что это не ведёт к вейбелевской неустойчивости и генерации магнитного поля для широкого набора функций распределения частиц. Показано также, что спектр синхротронного излучения самосогласованно движущихся релятивистских частиц может быть использован для идентификации имеющихся особенностей функции распределения частиц. В частности, он не является чисто степенным и может содержать изломы и экстремумы, даже если усреднённая по углам функция распределения частиц является степенной.

Найденный класс токовых слоёв и трубок тока с локализованным магнитным полем важен для интерпретации соответствующих наблюдений в лабораторной, ионосферной и астрофизической плазме, например, в отношении структуры магнитного поля в релятивистских ударных волнах и джетах, свойственных ядрам активных галактик, микроквасарам и источникам гамма-всплесков. На основе полученных решений возможно единое описание различных уединённых токовых конфигураций, в том числе в долгоживущей магнитостатической турбулентности, например, вызванной лазерными импульсами или пучками частиц в плазме. Более того, полученные решения впервые дают надёжное теоретическое обоснование возможности существования квазистатических уединённых токовых образований и магнитостатической турбулентности в бесстолкновительной плазме с немаксвелловскими анизотропными функциями распределения частиц по импульсам.

Публикации

1. Мартьянов В.Ю., Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В. Насыщение релятивистской вейбелевской неустойчивости и стационарные токовые слои в бесстолкновительной плазме // ЖЭТФ, т. 134, № 6, с. 1225-1237 (2008).
2. Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В., Мартьянов В.Ю. Самосогласованные токовые структуры в релятивистской плазме // Известия ВУЗов. Радиофизика, т. LII, № 2, с. 85-94 (2009).

3. Мартьянов В.Ю., Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В. Магнитостатические структуры в бесстолкновительной плазме и их синхротронное излучение // Письма в астрономический журнал (2009) (submitted).
4. Kocharovsky V.V., Kocharovsky Vl.V., Martyanov V.Ju. Self-consistent current sheets and filaments in relativistic collisionless plasma with arbitrary energy distribution of particles // PRL (2009) (submitted).

1.22. Впервые разработаны и созданы малогабаритные полупроводниковые приборы миллиметрового диапазона длин волн (8 – 2,5 мм) на базе диодов Шоттки, одновременно выполняющие функции и модуляторов, и генераторов шума, электрически перестраиваемых в широком интервале эффективных температур (155-600 К). Физической основой этих приборов является зависимость сопротивления и эффективной температуры излучения диодов Шоттки от тока смещения. Применение таких приборов в качестве модуляторов-калибраторов в радиометрах миллиметрового диапазона позволило проводить как измерения собственного излучения атмосферы и подстилающей поверхности, так и тепловую калибровку радиометров без использования находящихся при разных температурах согласованных нагрузок (в частности, охлаждаемых кипящим азотом) и устройств для их подключения. Это открыло новые возможности для создания малогабаритных высокочувствительных микроволновых комплексов для исследования окружающей среды.

Авторы: Л.И.Федосеев, А.П.Шкаев, А.А.Швецов, Л.М.Кукин (ИПФ РАН), В.Г.Божков, В.А.Геннеберг, И.В.Петров, (ОАО «НИИПП», г. Томск)

Аннотация. Обычно модуляционные радиометры начинаются с модулятора-коммутатора, позволяющего периодически подключать входные цепи приемника то к антенне, то поочередно к двум источникам калиброванных сигналов. В миллиметровом диапазоне в качестве последних обычно используются согласованные нагрузки, находящиеся при различных температурах (как правило, одна из них охлаждается кипящим азотом). Сотрудниками ИПФ РАН (г. Нижний Новгород) и ОАО «НИИПП» (г. Томск) предложен и разработан новый прибор – полупроводниковый **модулятор-калибратор**, совмещающий в себе функции и модулятора, и калибратора.

Основой **модулятора-калибратора** является расположенная посередине суженной части волновода микросхема, включающая в себя от 7 до 14 (в зависимости от диапазона) параллельно запитываемых цепочек из 4 последовательно включенных диодов с барьером Шоттки (ДБШ), все сильнее “закорачивающих” волновод по мере увеличения тока смещения. При этом изменяется и эффективная температура генерируемого шума: сначала она падает почти до половины комнатной, а затем возрастает до величины, почти вдвое превышающей последнюю. Такая зависимость эффективной температуры генерируемого шума от тока смещения связана с “конкуренцией” найквистовского шума последовательного сопротивления ДБШ, дробового шума барьера диода Шоттки, определяемого соотношением емкостной и активной составляющих импеданса ДБШ, и последующего разогрева электронного газа [1-3].

Полупроводниковый модулятор-калибратор на базе ДБШ позволяет выполнять измерение и калибровку прибора по собственному излучению модулятора, обходясь при этом без использования обычно применяемых согласованных нагрузок с разными температурами излучения и без устройства для их подключения, как правило, увеличивающего потери во входном тракте. При этом еще и вдвое увеличивается время приема исследуемого излучения по сравнению с обычным только что упомянутым модуляционным режимом с двумя согласованными нагрузками.

К настоящему времени разработаны модуляторы-калибраторы следующих диапазонов: 26,5-37,5; 50-55; 103-118 и 113-123 ГГц. Все они успешно протестированы в радиометрах. Так, фрукуационный порог чувствительности (при постоянной времени 1с) 3-миллиметрового радиометра не превышает 0,05 К, а 6- и 8-миллиметрового – не хуже 0,03 К [4]. Ведется разработка модуляторов-калибраторов на 140 и 230 ГГц.

Литература

1. Наумов А.И.. Потери преобразования и относительная температура шума смесителей ММ диапазона волн // Всесоюзный симпозиум по распространению субмиллиметровых и миллиметровых волн в атмосфере Земли и планет, посвященный 250-летию Академии наук СССР. Москва-Горький. 1974. Тезисы докладов. С. 60-61.
2. Viola I. J. Jun, Mattauch R.J. // J. Appl. Phys.. 1973. V.44. No 6 (2). P.2805.
3. Божков В.Г., Малаховский О. Ю., Леуский В.Е., Струков И.А. Исследование высокочастотных шумов и вольт-амперных характеристик диодов с барьером Шоттки в области больших прямых токов // Радиотехника и электроника. 1983. Т.28. № 6. С.1182.
4. Федосеев Л.И., Швецов А.А., Шкаев А.П., Демкин В.М., Караштин Д.А., Кукин Л.М., Божков В.Г., Геннеберг В.А., Петров И.В., Щитов А.М. Радиометры миллиметрового диапазона длин волн с твердотельными модуляторами-калибраторами // 18-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Материалы конференции. 8-12 сентября 2008 г. Севастополь, Крым, Украина. Издательство Weber. С. 878-879.

Публикации

1. Л.И.Федосеев, В.Г.Божков, В.А. Геннеберг, И.В.Петров, А.П.Шкаев. Радиометр 3-миллиметрового диапазона длин волн с модулятором-калибратором // Известия ВУЗов - Радиофизика. 2007. Т.50. № 10-11, С.948 – 952.
2. Л.И.Федосеев, Л.М.Кукин. Электрически управляемые генераторы шума миллиметрового диапазона // Приборы и техника эксперимента. 2009. №2. С.173-174.
3. А.А.Швецов, В.М.Демкин, Д.А.Караштин, Н.К.Скалыга, Л.И.Федосеев. Микроволновый спектрорадиометрический комплекс для дистанционного исследования термической структуры стратосферы. Изв. Вузов, Радиофизика, 2009. Т.52. №10-11 – В печати

1.23. Обнаружено, что наблюдавшиеся спутником TRACE крупномасштабные изгибные колебания корональной магнитной петли с периодом ~ 10 мин (так называемая кинк-мода) проявляются также в синхронных колебаниях интенсивности микроволнового излучения петли. Обнаруженный сдвиг фазы между кинк-осцилляциями и осцилляциями микроволнового излучения обусловлен «качанием» диаграммы направленности микроволнового излучения, возникающим при возбуждении изгибных колебаний магнитной петли.

Авторы: А.Г.Кисляков (ИПФ РАН, ННГУ), К.Г.Кислякова (ННГУ), М.Л.Ходаченко (ИКИ Австрийской АН, Грац, Австрия), С.Урпо. (обсерватория Метсахови, Финляндия)

Аннотация. Наблюдения радиоизлучения активной области Солнца AR8910 проводились 23 марта 2000 г. на 14-м радиотелескопе обсерватории Метсахови (Финляндия). Получено радиоизображение диска Солнца (см. Рис.1).

Мониторинг активной области AR8910 проводился в период 11:30-12:30 UT, когда в ней произошла вспышка типа M.2.0. Полученный микроволновый профиль

обрабатывался методом БПФ со «скользящим» окном. Выделена составляющая с периодом колебаний 10 мин.

На Рис.2 показана фотография активной области AR8910 в УФ спектре, сделанная с борта ИСЗ TRACE в интервале времени 11:30-12:00 (т.е. в период развития вспышки, см. Aschwanden, M.J., DePontieu, B., Schrijver, C.J., and Title, A. 2002, Solar Physics, 206, 99-132).

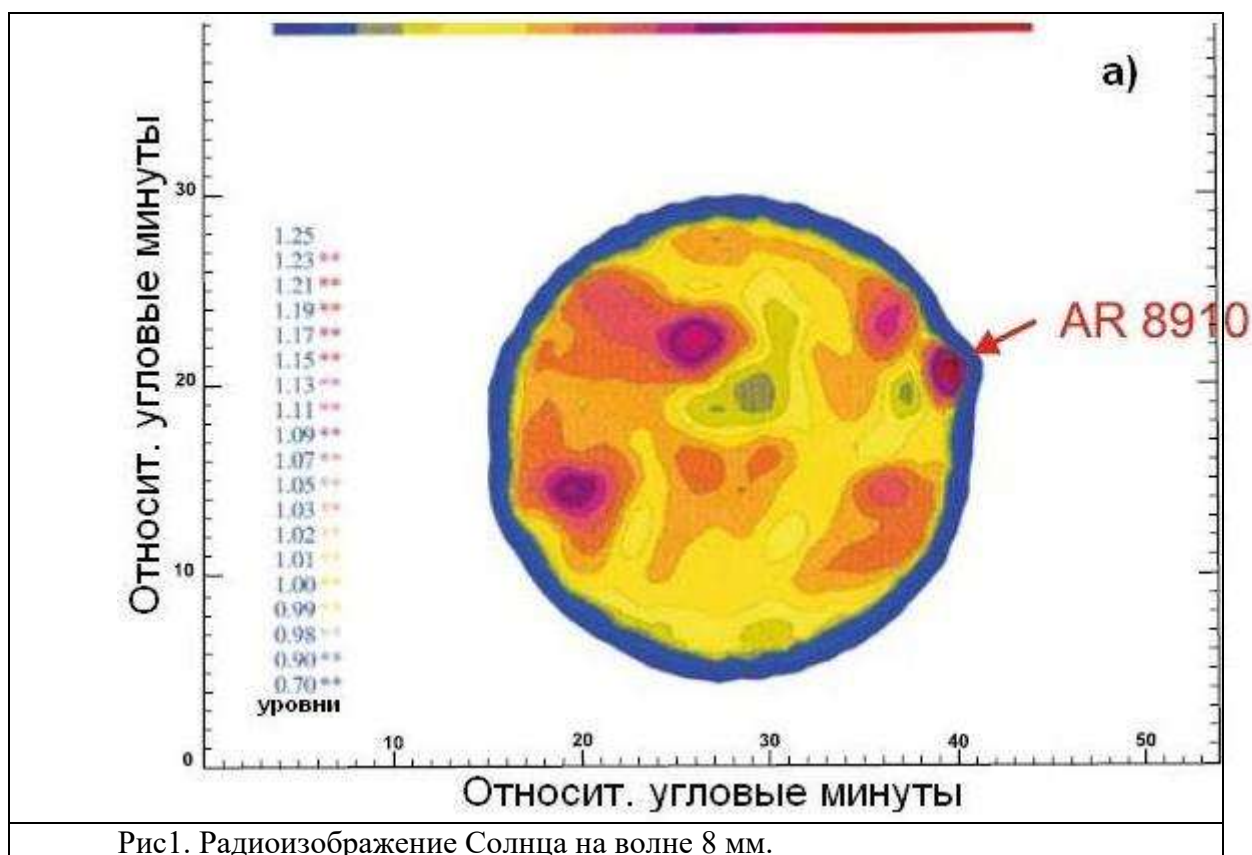
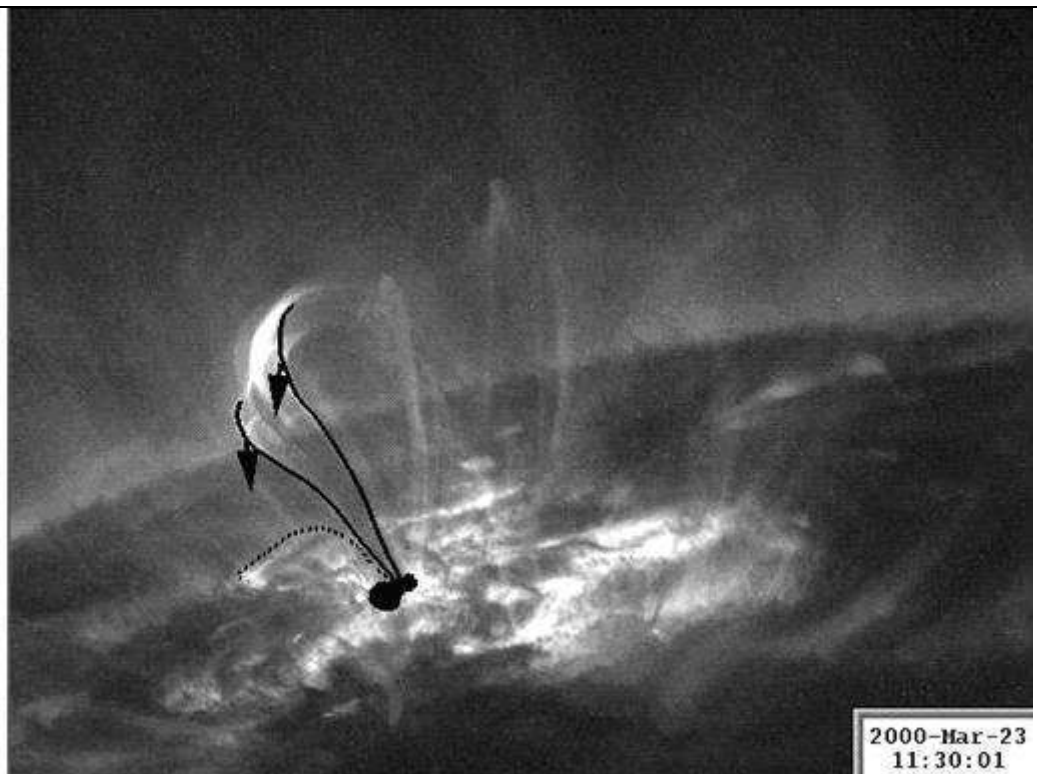


Рис1. Радиоизображение Солнца на волне 8 мм.

Полученные данные о колебаниях петли обрабатывались (удалялись, в частности, тренды в данных) и определялся период колебаний относительно равновесного положения. При наблюдениях 23 марта 2000 г. этот период составлял, в среднем, 615 с. На Рис. 3 представлены результаты наблюдений колебаний петли по УФ снимкам. Там же представлена кривая осцилляций микроволнового излучения области AR8910, где находилась наблюдаемая петля и куда была направлена антенна радиотелескопа. График Рис. 3 показывает синхронность осцилляций микроволнового излучения с кинк-колебаниями петли (при наличии сдвига фазы).

Сдвиг фазы между кривыми, возможно, связан с направленностью микроволнового излучения петли.



**Наблюдаемый период колебаний петли 615 с.
(Ашванден и др, 2002)**

Рис.2. Иллюстрация измерений амплитуды кинк-колебаний петли

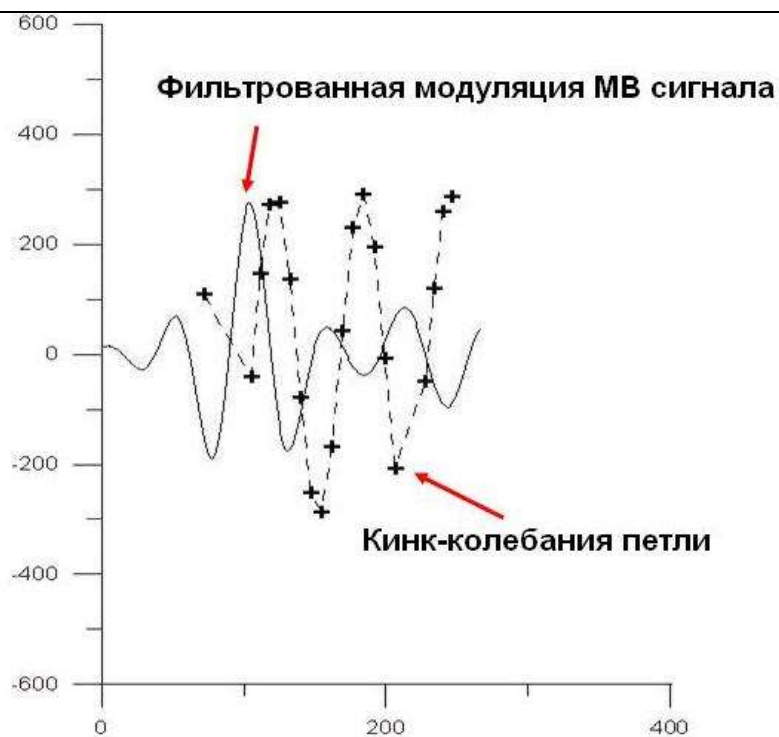


Рис. 3. Сопоставление радио- и оптических наблюдений.

Публикации

1. Khodachenko, M.L., Zaitsev, V.V., Kislyakov, A.G., Stepanov, A.V., Equivalent electric circuit models of coronal magnetic loops and related oscillatory phenomena on the Sun, *Space Sci. Rev.*, 2009 (DOI:10.1007/s11214-009-9538-1).
2. Khodachenko, M.L., Kislyakov, A.G., Kislyakova, K.G., Zaitsev, V.V., Zaquarashvili, T.V., Panchenko, M., Rucker, H.O., Detection of large-scale kink oscillations of coronal loops manifested in modulations of solar microwave emission, Central European Solar Physics Meeting, CESPМ-2009, Sept.30-Oct.2, 2009, Bairisch Kölldorf, Austria, (oral).
3. Khodachenko, M.L., Kislyakov, A.G., Panchenko, M., Zaitsev, V.V., Rucker, H.O., Manifestation of large-scale kink oscillations of coronal loops in very-low frequency modulations of solar microwave emission, European Planetary Science Congress, EPSC2009, Potsdam, Germany, Sept. 2009, (oral).

2. Отделение гидрофизики и гидроакустики

2.1. Создан уникальный прямоточный высокоскоростной ветро-волновой канал на базе Большого термостратифицированного бассейна ИПФ РАН.

Параметры установки: длина рабочей части, ширина и высота рабочего канала 7 м, 0.4 м и 0,4 м, соответственно; рабочие скорости ветра 3-25 м/с (эквивалентные скорости ветра 6-60 м/с).

Установка обеспечена оборудованием для проведения измерений параметров ветра, волнения и течений и позволяет проводить моделирование взаимодействия океана и атмосферы в широком диапазоне скоростей ветра от слабых до ураганных, включая тепло-массо-энергообмен в атмосферном пограничном слое; образование пены и брызг; формирование коротковолновой части спектра поверхностных волн и динамику верхнего слоя стратифицированного океана.

Авторы: Ю. И.Троицкая , Казаков В.И., Сергеев Д.А. Коротков Д.П., Дюнин Е.В.

2.2. В 2007-2009 гг. в районе шельфа и свала глубин северо-восточной части Черного моря проведена серия уникальных комплексных подспутниковых экспериментов с целью развития дистанционных методов диагностики верхнего слоя океана. Идентифицированы и выяснены причины возникновения неоднородностей, наблюдаемых на спутниковых радиолокационных панорамах океана. Найдено, что полосовые сликовые структуры в прибрежной зоне моря связаны с концентрацией поверхностно-активных веществ, ориентированы вдоль основного направления струйного течения и локализованы в зонах конвергенции поперечных компонент течений, обусловленных обтеканием рельефа дна. Показано, что фронтальная зона на спутниковом РСА-изображении совпадает с областью резких изменений скорости ветра, течений и температуры воды и воздуха.

Авторы: С.А. Ермаков, Э.М. Зуйкова, И.А.Капустин, Т.Н. Лазарева, Е.В. Макаров, И.А. Сергиевская, В.И. Титов, В.В. Баханов, Н.А.Богатов, А.В. Ермошкин, В.И. Казаков, О.Н. Кемарская, Ю.И. Троицкая

Аннотация. В 2007-2009 гг. в районе шельфа и свала глубин северо-восточной части Черного моря проведена серия уникальных комплексных подспутниковых экспериментов. В ходе экспериментов проводились многоуровневые измерения с судов с использованием акустического профилографа скорости течений, радиолокационных и оптических средств наблюдений ветрового волнения, средств измерений характеристик поверхностных пленок и приводного ветра, а также береговым радиолокатором и, в ряде случаев, с использованием спутниковой радиолокационной съемки морской поверхности (спутник Envisat, ASAR). Изучена изменчивость гидрологических характеристик верхнего слоя океана (в т.ч. течений и температуры), характеристик ветровых волн и пленок на морской поверхности, характеристик приводного слоя атмосферы (поток импульса, пульсаций скорости ветра...).

Выполнены исследования сликовых полос на морской поверхности и их связи со структурой струйных приповерхностных течений. Сливовые полосы наблюдались при достаточно слабом ветре и были ориентированы вдоль прибрежных течений и приблизительно параллельно изобатам. При пересечении сликовых полос регистрировались профили обратного акустического рассеяния и скоростей течений, начиная с глубин порядка 1 м до дна, проводилось взятие проб поверхностно-активных веществ (ПАВ) сеточным методом, а также измерение скоростей течений на поверхности с использованием специальных поплавков и GPS-приемников. Получено, что в сликовых полосах существенно повышается концентрация ПАВ и упругость пленок, а это в свою

очередь приводит к подавлению коротких ветровых волн сантиметрового-дециметрового диапазонов. Анализ данных измерений профилей обратного акустического рассеяния показал, что сликовые полосы находятся над областями повышенной концентрации взвеси в приповерхностных слоях воды. На основе измерений скоростей течений сделан вывод о том, что сликовые полосы ориентированы вдоль направления скорости основного течения и расположены в зонах конвергенции сравнительно малой, поперечной к основному течению компоненты горизонтальной скорости течения. Сликовые полосы могут рассматриваться как индикаторы прибрежных течений и использоваться для изучения структуры этих течений и их изменчивости. Данные зоны связаны с обтеканием стратифицированной жидкостью донного рельефа.

Публикации

1. Баханов В.В., Богатов Н.А., Волков А.С., Ермошкин А.В., Зуйкова Э.М., Казаков В.И., Кемарская О.Н., Лобанов В.Н., Репина И.А., Титов В.И. Натурные исследования масштабов изменчивости поверхностного волнения и приводного ветра в районе шельфа. Препринт № 745 издательства Института прикладной физики РАН, 2007, 12 с.
2. Троицкая Ю. И., Долина И. С., Ермошкин А. В., Баханов В. В., Зуйкова Э. М., Репина И. А., Титов В. И. Отрицательные корреляции изменчивости приводного ветра и поверхностного волнения. Препринт № 742 издательства Института прикладной физики РАН, 2007, 20 с.
3. Ю.И. Троицкая, И.С. Долина, А.В. Ермошкин, В.В. Баханов, Э.М. Зуйкова, И.А. Репина, В.И. Титов. Отрицательные корреляции изменчивости приводного ветра и поверхностного волнения. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2008, том 44, № 4, с. 527-542.
4. С.А. Ермаков, Л.А. Гущин, Е.В.Макаров, И.А.Сергиевская Натурные исследования пленочных сликов в поле приповерхностных сдвиговых течений. В Проявление глубинных процессов на морской поверхности. Материалы третьей межведомственной конференции. 10 - 12 апреля 2007 г, Н. Новгород, Институт прикладной физики РАН, 2008, с. 44 - 52.
5. В.В. Баханов, А. С.Волков, А. В. Ермошкин, Э. М. Зуйкова, В.И. Казаков, О. Н. Кемарская, И. А. Репина, В. И. Титов. Натурные исследования изменчивости поверхностного волнения и приводного слоя атмосферы в шельфовой зоне. В Проявление глубинных процессов на морской поверхности. Материалы третьей межведомственной конференции. 10 - 12 апреля 2007 г, Н. Новгород, Институт прикладной физики РАН, 2008, с. 16 - 24.
6. Ермаков С.А., Капустин И.А., Лазарева Т.Н., Макаров Е.В., Сергиевская И.А. Наблюдения сликовых полос и неоднородных течений в прибрежной зоне Черного моря. Тез.Докл.6 Открытой конф. по дистанционному зондированию, Москва, ИКИ РАН, 2008
7. V.V. Bakhanov, N.A. Bogatov, A.V. Ermoshkin, V.I. Kazakov, O.N. Kemarskaya, V.N. Lobanov, I.A. Repina, V.I. Titov, Yu.I. Troitskaya and E.M. Zuikova. Subsatellite studies of ocean upper layer and atmospheric near-surface layer variability in a shelf area. Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-00811, 2008 SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-00811 EGU General Assembly 2008.
8. S. Ermakov, I. Kapustin, T. Lazareva, E. Makarov, I. Sergievskaya. Marine slicks due to inhomogeneous coastal currents. Geophys.Res. Abst. 2009
9. V. Bakhanov, N. Bogatov, A. Ermoshkin, V. Kazakov, O. Kemarskaya, V. Lobanov, I.Repina,

V. Titov, Yu. Troitskaya, and E. Zuikova. Subsatellite experiments in a coastal region of the Black sea. Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-10560-4, 2009 EGU General Assembly 2009.

10. V.V. Bakhanov, N.A. Bogatov, A.V. Ermoshkin, E.M. Zuikova, V.I. Kazakov, O.N. Kemarskaya, I.A. Repina, V.I. Titov, Yu. I. Troitskaya. Subsatellite experiments in the north-eastern part of the Black sea. 2009 IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium Proceedings. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 4 p., 2009.
11. В.В. Баханов, А.В. Ермошкин, Э.М. Зуйкова, О.Н. Кемарская, В.А. Телегин. О возможности использования судового радиолокатора для определения состояния морского волнения и оценки приводного ветра. В Проявление глубинных процессов на морской поверхности. Программа, тезисы докладов. Четвертая межведомственная конференция. 1 - 3 апреля 2009 г., Н. Новгород, Институт прикладной физики РАН, 2009, с. 24.
12. Баханов В.В., Богатов Н.А., Ермошкин А.В., Зуйкова Э.М., Казаков В.И., Кемарская О.Н., Лобанов В.Н., Репина И.А., Титов В.И., Троицкая Ю.И. Подспутниковые исследования изменчивости характеристик верхнего слоя океана и приводного слоя атмосферы в шельфовой зоне. В Проявление глубинных процессов на морской поверхности. Программа, тезисы докладов. Четвертая межведомственная конференция. 1 - 3 апреля 2009 г., Н. Новгород, Институт прикладной физики РАН, 2009, с. 23.

2.3. Создан метод приближенного аналитического описания модовой структуры поля в подводном звуковом канале (ПЗК) с флуктуациями скорости звука, вызванными случайными внутренними волнами. Метод базируется на совместном использовании (i) стохастической лучевой теории, развитой авторами для описания хаотической динамики лучей в случайно-неоднородном ПЗК, и (ii) соотношений, устанавливающих связь между лучевым и модовым представлениями поля в волноводе. Получено аналитическое описание перераспределения звуковой энергии между модами вследствие рассеяния волн на неоднородностях среды. Проанализированы искажения звуковых импульсов, переносимых отдельными модами. Показано, что на тысячекилометровых трассах флуктуации скорости звука вызывают уширение импульсов пропорциональное $r^{3/2}$, где r – дистанция наблюдения, и смещение времен их прихода пропорциональное r^2 .

Авторы: А.Л. Вировлянский, А.Ю. Казарова, Л.Я. Любавин

Аннотация. Изучение эволюции модовой структуры поля в подводном звуковом канале с флуктуациями показателя преломления, вызванными случайными внутренними волнами, является одной из классических задач акустики океана. Традиционный подход к ее решению базируется на использовании уравнений взаимодействия мод (mode coupling equations). Эти уравнения, однако, весьма сложны и их анализ требует привлечения численных методов.

Авторами предложен альтернативный подход, позволяющий получать аналитические оценки. Его идея заключается в том, чтобы для описания хаотической динамики мод воспользоваться результатами, полученными при анализе гораздо лучше изученной хаотической динамики лучей. Развитая авторами стохастическая лучевая теория применена совместно с соотношениями, связывающими лучевое и модовое представления поля в неоднородном волноводе.

Центральным моментом обсуждаемого подхода является тот факт, что поле каждой моды формируется лучами с переменной действия, которая согласно правилу квантования

с точностью до постоянного множителя равна m/ω , где m – номер моды, а ω – частота. Время пробега звука вдоль такого луча равно времени прихода фрагмента импульсного сигнала (переносимого m -й модой) с мгновенной частотой ω . В плоскостром (невозмущенном) волноводе для каждой моды на каждой частоте имеется всего два таких луча. В присутствии флуктуаций скорости звука, вызывающих лучевой хаос, число лучей, формирующих моду, экспоненциально растет с дистанцией и на тысячекилометровых трассах становится очень большим. При этом становится возможным построение приближенного статистического описания флуктуаций амплитуд мод.

Получены неожиданно простые аналитические оценки, характеризующие перераспределение звуковой энергии между модами вследствие рассеяния звука на флуктуациях показателя преломления. Значительное внимание уделено анализу искажений модовых импульсов, то есть звуковых сигналов, переносимых отдельными модами. Ранее методами численного моделирования было показано, что флуктуации скорости звука на тысячекилометровых трассах вызывают дополнительное (по сравнению со случаем невозмущенного волновода) уширение модовых импульсов пропорциональное $r^{3/2}$ и смещение времени прихода импульса пропорциональное r^2 (Colosi and Flatte, 1996). В рамках предложенного подхода получены оценки уширения и смещения модовых импульсов, выяснено, при каких условиях зависимости этих величин от дистанции пропорциональны указанным степеням расстояния r , и найдены коэффициенты пропорциональности.

Публикации

1. A.L. Virovlyansky, A.Yu. Kazarova, L.Ya. Lyubavin, Ray-based description of normal modes in a deep ocean acoustic waveguide, J. Acoust. Soc. Am., V. 125, No. 3, P.1362–1373 (2009).
2. D. Makarov, S. Prants, A. Virovlyansky, G. Zaslavsky. Ray and wave chaos in ocean acoustics. Изд-во World Scientific. Монография. В печати.

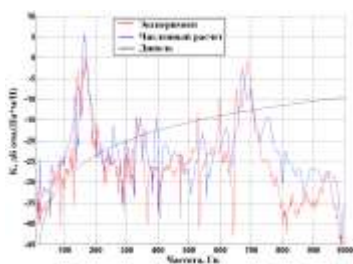
2.4. Разработана и апробирована технология численного моделирования задач динамики взаимодействия жидкости со сложными упругими конструкциями, в основе которой лежит метод верификации результатов счета на масштабных физических моделях. Созданные по данной технологии численные модели обладают высокой степенью достоверности, что позволяет их использовать для поиска источников виброактивности, визуализации вибрационного и акустического полей в условиях малого количества измерительных данных, анализа динамики в области упругопластических деформаций, акустического проектирования и прогноза уровня акустического поля. Достоверность результатов моделирования подтверждена экспериментально с использованием масштабных моделей исследуемых конструкций для силы цели, поля излучения, локализации приложения переменных сил. Путем сопоставления численных результатов с измерениями, выявлено, что погрешность расчета уровня акустических полей не превышает 3-5дБ.

Авторы: В.В. Артельный, П.В. Артельный, П.И. Коротин, М.Б. Салин, Е.М. Соков, А.С. Суворов

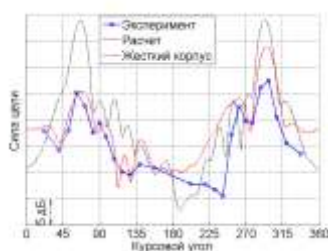
Аннотация. Решена задача разработки и экспериментальной апробации конечно-элементных моделей широкого класса упругих систем в интересах проектирования конструкций с заданными динамическими характеристиками. Совместное проведение физического и численного экспериментов на масштабной модели обеспечивает доводку конечно-элементной модели до получения количественного совпадения результатов

численного моделирования с результатами измерений. Это открывает возможность применения доведенной конечно-элементной модели для получения акустических характеристик прототипа. Данный подход решает проблему анализа виброакустических характеристик конструкций в наиболее сложном частотном диапазоне, когда упругое тело имеет волновые размеры порядка единицы относительно упругих волн в конструкции, окружающей среде и в среде, заполняющей тело. Экспериментально исследованы и найдены границы применимости моделирования при воспроизведении характеристик первичного и вторичного акустического поля, вибрационного поля, параметров звукоизоляции оболочек.

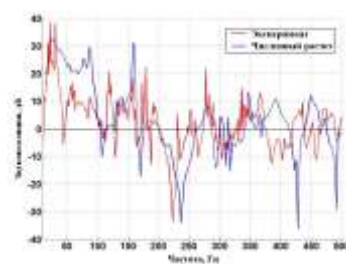
Характерные примеры применения технологии конечно-элементного моделирования динамики и виброакустических полей упругого тела представлены на графиках:



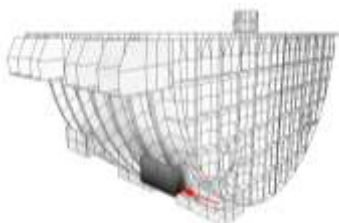
коэффициент передачи переменной силы во внешнее поле



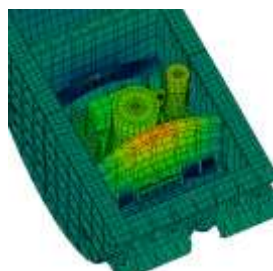
сила цели



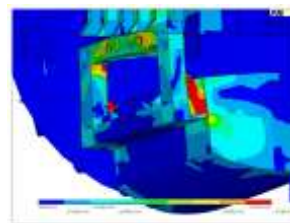
передача воздушного шума в среду



поиск источника (градиции серого – результат расчета)



визуализация колебаний (средняя невязка ~5,6%)



ударное воздействие (красным – область пластики)

Публикации

1. В.В. Артельный, П.И. Коротин, А.С. Суворов. Определение вклада источника в вибрационное и акустическое поле сложной механоакустической системы. Сборник трудов XIX сессии Российского акустического общества. т.3, г. Н.Новгород, 2007, с.227-231
2. В.В. Артельный, П.И. Коротин, В.А. Лаухин. Численное конечно-элементное моделирование при оценке акустического качества конструкций. Труды Нижегородской акустической научной сессии, ННГУ, 2002 г., с.130
3. В.В. Артельный, П.И. Коротин, С.Ю. Петров, А.С. Суворов. Технология расчетно-экспериментального акустического проектирования. Сборник трудов конференции Корабельная ядерная энергетика, Н.Новгород, 2004 г., с.17
4. Коротин П.И., Салин Б.М., Суворов А.С. Вопросы численного моделирования рассеяния акустических волн на телах сложной формы с использованием метода конечных элементов. Сборник трудов 20 сессии РАО. М., 2008. С.159-162

5. Артельный В.В., Коротин П.И., Соков Е.М. Поиск источника в механоакустических системах на основе методов обращения волнового фронта и времени // Акуст. журн., 2008. т.54. №3.
6. Артельный П.В., Коротин П.И. Фокусировка вибрационного поля в упругих системах конечного размера методом обращения времени // Акуст.журн., 2009. т.55. №6.
7. Pavel Artelnyy, Pavel Korotin and Anatoly Suvorov. A new method of localization of vibration sources and operational defects in complex constructions based on the time reversal and the finite element model of system (Part 1. Theoretical researches) // Proceedings of the 16th International Congress on Sound and Vibration, Krakow, 2009
8. Pavel Artelnyy, Victor Artelnyy, Pavel Korotin, Alexey Sokov and Evgeny Sokov. A new method of localization of vibration sources and operational defects in complex constructions based on the time reversal and the finite element model of system (Part 2. Experimental works) // Proceedings of the 16th International Congress on Sound and Vibration, Krakow, 2009
9. Артельный П.В, Коротин П.И. Исследование фокусировки широкополосных сигналов, обращенных во времени, в упругих системах с конечным набором мод // Сборник трудов XIX сессии российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2007. Т. 1. С. 270-274.
10. Артельный П.В., Коротин П.И., Соков А.М. Алгоритмы поиска источника виброактивности в механоакустических системах // Сборник трудов XX сессии Российского акустического общества, М.: ГЕОС, 2008. Т. 3. С. 234-237.

2.5. Создан уникальный комплекс оптических приборов для диагностики в реальном времени морского волнения в широком диапазоне длин поверхностных волн от сантиметров до сотен метров путем анализа изображения морской поверхности. Комплекс позволяет регистрировать спектры дм-см волн и спектрально – кинематические характеристики декаметровых поверхностных волн. На основе двухмасштабной модели волнения разработаны модели отображения поверхностных волн при произвольном освещении и алгоритмы обработки изображений поверхности, позволяющие восстанавливать спектры волнения и спектрально – кинематические характеристики декаметровых волн. Проведены натурные эксперименты по исследованию волнения моря с помощью оптического комплекса. В частности, исследована динамика волнения в ветровом фронте и на шельфовой зоне, разработана модель двумерного спектра волнения для волн длиной от сантиметров до метра, апробированы методы анализа оптических панорам морской поверхности для определения спектрально - кинематических характеристик декаметровых волн, исследованы проявления групповой структуры декаметровых волн.

Авторы: В.И. Титов, Э.М. Зуйкова, А.Г. Лучинин, Ю.И. Троицкая, В.В. Баханов, О.Н. Кемарская.

Аннотация. В состав комплекса входят двумерный оптический спектраллизатор (ДОСА) для регистрации спектров короткомасштабных поверхностных волн по спектрам изображения морской поверхности и две линейки фотоприемников (ПЗС-линейки) для формирования оптических панорам морской поверхности (изображения поверхности в координатах дальность – время), которые используются для определения спектрально – кинематических характеристик декаметровых волн. Комплекс может устанавливаться на берегу, на судах и на вертолетах.

Разработаны теоретические основы и методы работы приборов комплекса. На основе двухмасштабного представления поверхностного волнения разработана “универсальная” модель видимости длинных волн, которая применима при любых условиях освещения морской поверхности, в том числе при облачном небе или в зоне солнечных бликов а также получено уточненное выражение для спектра изображения морской поверхности при освещении рассеянным светом неба, которое позволило разработать метод восстановления пространственных спектров волнения по данным оптического спектрального анализатора ДОСА. Метод также использует калибровку спектрального анализатора с помощью эталонного объекта, имитирующего морскую поверхность. Предложен метод формирования панорам, позволяющий устранить влияние качки судна при регистрации панорам с борта судна и метод восстановления кинематических характеристик длинных волн по двум оптическим панорамам, который не требует привлечения дисперсионного соотношения для волн.

Проведены натурные эксперименты по исследованию волнения моря с помощью оптического комплекса. В частности, исследована динамика волнения в ветровом фронте, на шельфовой зоне. Разработана предварительная модель двумерного спектра волнения для волн длиной от сантиметров до метра. Апробированы разработанные методы анализа оптических панорам морской поверхности, которые позволили определить кинематические характеристики длинных волн. Впервые на оптических панорамах зарегистрировано проявление групповой структуры длинных энергонесущих волн.

Публикации

1. E.M. Zuikova, V.I. Titov, J.I. Troitskaja. Wave spectra from daylight imagery of sea surface. Proc. V International Conference Current problems in optics of natural waters. ONW'2009.St-Petersburg, Russia, P.345-348, 2009.
2. V.I. Titov, E.M. Zuikova, O.N. Kemarskaja, J.I. Troitskaja. Optical remote sensing of sea surface waves. Proc. V International Conference Current problems in optics of natural waters. ONW'2009.St-Petersburg, Russia, P.139-143, 2009.
3. V.I. Titov, V.V Bakhanov, O.N. Kemarskaja, A.G. Luchinin, J.I. Troitskaja, E.M. Zuikova. Investigation of sea roughness with complex of optical devices. Proc. Conference SPIE'09 "Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions 2009", Берлин, 31.08-03.09.2009, 11 стр.
4. Зуйкова Э.М., Караев В.Ю., Титов В.И. Исследование возможности определения параметров волнения по аэрофотоснимкам поверхности моря. Четвертая Всероссийская научная школа и конференция “Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред”, 30.06-03.07, Муром, Материалы конференции (www.mivlgu.ru/conf/murom2009/main.php?page=26), 2009.
5. Направлена в ФИПС (Федеральный Институт Промышленной Собственности) от ИПФ РАН заявка на патентование “Устройство оптической спектральной обработки изображения шероховатой поверхности” Зуйкова Э.М., Титов В.И., Троицкая Ю.И. Регистрационный номер № 2009103024 от 30.01.2009.
6. Направлена в ФИПС (Федеральный Институт Промышленной Собственности) от ИПФ РАН заявка на патентование “Способ определения кинематических характеристик морских волн по оптическим панорамам морской поверхности” Зуйкова Э.М., Титов В.И., Троицкая Ю.И., 2009.
7. В.В. Баханов, Э.М. Зуйкова, О.Н. Кемарская, В.И. Титов, Ю.И. Троицкая “Определение спектрально-кинематических характеристик поверхностного волнения по оптическим изображениям поверхности моря”. В сборнике научных статей: Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса:

Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Выпуск 6. Том 1. М. Азбука-2000, 2009, с. 303-313.

8. В.В. Баханов, Э.М. Зуйкова, О.Н. Кемарская, В.И. Титов. “Диагностика характеристик поверхностных волн по оптическим панорамам морской поверхности”. Материалы Четвертой межведомственной конференции “Проявление глубинных процессов на морской поверхности”. ИПФ РАН, Н.Новгород, 1-3 апреля 2009.

2.6. Предложен и обоснован новый способ лидарного зондирования океана, который позволит осуществлять дистанционное измерение частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) водных слоев, необходимой для прогнозирования дальности действия оптических средств подводного наблюдения и коррекции искажений изображения, обусловленных рассеянием света в воде. Показано, что ЧКХ водного слоя заданной толщины можно определить по изображению светового пятна, которое появляется на нижней границе слоя в момент прохождения через нее лазерного импульса. Указан алгоритм восстановления ЧКХ по этому изображению. Предложены конкретные схемы лидаров для измерения ЧКХ.

Автор: Л.С. Долин

Аннотация. Частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ) водного слоя называют коэффициент ослабления контраста изображения тест-объекта с синусоидальным распределением яркости, наблюдаемого через водный слой. Ее можно также определить как пространственный спектр изображения точечного источника света или пространственный спектр распределения облученности в поперечном сечении бесконечно узкого пучка света, прошедшего через водный слой. ЧКХ играет фундаментальную роль в теории подводного видения, ее знание необходимо для построения моделей изображений, формируемых оптическими системами подводного наблюдения (в том числе, лазерными), оценки дальности действия этих систем и устранения искажений изображения, обусловленных рассеянием света в воде.

До настоящего времени измерения ЧКХ проводились только с помощью погружаемых в воду источников и приемников света. Предлагаемый метод дистанционного измерения ЧКХ основывается на регистрации изображения светового пятна, которое формируется обратно рассеянным светом при прохождении лазерного импульса через водную толщину. Показано, что двумерный пространственный спектр этого изображения в момент времени t после посылки зондирующего импульса воспроизводит квадрат частотно-контрастной характеристики водного слоя толщины $z_t = ct/2$ (c - скорость света в воде) в диапазоне пространственных частот $k < 2\pi/d$, где d - ширина лазерного пучка на расстоянии z_t от источника, измеренная в воздухе. Указанное соотношение позволяет восстанавливать ЧКХ водных слоев различной толщины по изображению лазерного пятна, зарегистрированному в различные моменты времени.

Требуемое изображение может быть получено различными способами:

- с помощью многоэлементного фотодетектора, помещенного в фокальной плоскости приемного объектива лидара (или в плоскости изображения нижней границы слоя, если его толщина недостаточно велика по сравнению с фокусным расстоянием объектива);
- путем обработки серии импульсных откликов, поступающих на одноканальный фотоприемник с изменяющимся углом поля зрения (при этом изображение пятна восстанавливается по измеренной зависимости мощности эхо-сигнала от угла приема);

- путем измерения мощности эхо-сигнала, поступающего на приемник с узкой диаграммой направленности, в зависимости от угла между оптическими осями излучателя и приемника или от базы «излучатель-приемник».

Создание многоканального лидара для измерения ЧКХ в настоящее время представляется проблематичным ввиду отсутствия детекторов с требуемыми параметрами, а одноканальные лидары (с переменным углом поля зрения, со сканируемой приемной диаграммой или изменяющейся базой) могут быть реализованы с помощью существующих технических средств.

Публикации

1. L.S. Dolin. Lidar methods for retrieval of modulation transfer function and forward-scattering properties of water layers // Proceeding of V International Conference “Current Problems in Optics of Natural Waters”, St. Petersburg – 2009, P. 22-25.

2.7. Показано, что в неоднородных недиспергирующих средах при определенных условиях возможно существование «безотражательных» волн, которые могут переносить волновую энергию на большие расстояния. Получены точные решения линейного и нелинейного волнового уравнения для поверхностных и внутренних волн в океане переменной глубины, демонстрирующие «безотражательные» эффекты. Бегущая волна в такой среде не меняет своей формы во времени, однако, она должна быть знакопеременной. Ввиду безотражательного распространения волна значительно усиливается в прибрежной зоне и накатывается на берег с большей амплитудой. Выполнен анализ донных профилей, допускающих такое распространение, и рассмотрены геофизические приложения этих эффектов.

Авторы: Е.Н. Пелиновский, И.И. Диденкулова, Т.Г. Талипова

Аннотация. В рамках волнового уравнения с переменными коэффициентами выяснены условия, когда ВКБ решение становится точным для волн с широким спектром (исходная среда – недиспергирующая). В частности, для поверхностных волн, распространяющихся над неровным дном, показано, что существует конечное число профилей, когда волна не отражается, и для двух из них $h \sim x^{4/3}$ и $h \sim x^4$ она не меняет своей формы (во времени). Поскольку волновое поле состоит из двух компонент (смещение уровня воды и скорость частиц воды), то такая безотражательная волна имеет свои особенности, в частности ее форма должна быть знакопеременной. Такие же решения найдены для поверхностных волн в узких каналах со специфической батиметрией. Существование бегущих волн не является спецификой только линейного волнового уравнения, такие решения получены в рамках нелинейной задачи теории мелкой воды для параболического канала, линейно наклоненного к горизонту. Анализ реальных донных профилей показывает, что найденные безотражательные профили являются реализуемыми. В частности, один из таких профилей описывает дно в Таллиннском заливе Балтийского моря, где наблюдается сильное усиление волны с ее обрушением. Сильное усиление на безотражательных пляжах приводит к аномально большим накатам, что крайне важно для приложений.

Аналогичные расчеты сделаны для внутренних волн, распространяющихся вглубь океана. Уже давно наблюдалось, что внутренние волны легко проникают до дна (рис. 1). Показано, что наблюдаемые частоты Вайсяля – Брента в таких районах близки к безотражательным профилям, объясняя сильное проникновение волновой энергии вглубь океана

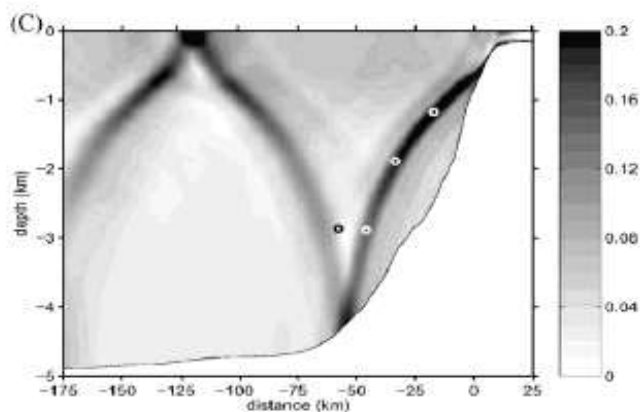


Рис. 1. Пучки распространяющихся внутренних волн в Бискайском заливе (расчеты в рамках полно нелинейных уравнений гидродинамики)

Публикации

1. Пелиновский Е.Н., Диденкулова И.И. Распространение волн в сильно неоднородной среде. *Нелинейные волны '2008*. Нижний Новгород: ИПФ, 2009, 191-204.
2. Choi, B.H., Pelinovsky, E., Kim, D.C., Didenkulova, I., and Woo, S.B. Two- and three-dimensional computation of solitary wave runup on non-plane beach. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2008, vol. 15, No. 3, 489-502.
3. Didenkulova I., Pelinovsky E., Soomere T. Exact traveling wave solutions in strongly inhomogeneous media. *Estonian Journal of Engineering*. 2008, vol. 14, No. 3, 220-231.
4. Диденкулова И.И., Заибо Н., Пелиновский Е.Н. Отражение длинных волн от «безотражательного» донного профиля. *Известия РАН, Механика жидкости и газа*, 2008, No. 4, 101 – 107.
5. Didenkulova I.I., Pelinovsky E.N. Non-dispersive traveling waves in strongly inhomogeneous water channels. Abstracts of *Nonlinear Evolution Equations and Dynamical Systems (NEEDS) 2009* (Sardinia, Italy, 16 - 23 May 2009), 2009. p. 38 - 39.
6. Didenkulova I., Pelinovsky E., Soomere T. Long surface wave dynamics along a convex bottom. *J Geophysical Research - Oceans*. 2009. Vol. 114, C07006. doi:10.1029/2008JC005027.
7. Didenkulova, I. and Pelinovsky, E. Non-dispersive traveling waves in strongly inhomogeneous water channels. *Physics Letters A.*, 2009, vol. 373, No. 42, 3883- 3887.
8. Талипова Т.Г., Пелиновский Е.Н., Петрухин Н.С. О проникновении длинной внутренней волны в толщу океана. *Океанология*, 2009, т. 49, No. 5, 673-680.

2.8. Показана необходимость учета дисперсионных эффектов при распространении волн цунами в мелководных районах с протяженным шельфом. Для этого выполнено численное моделирование распространения волн цунами в рамках слабонелинейной слабодисперсионной теории, основанной на уравнении Кортевега – де Вриза, и в рамках полно нелинейных уравнений Эйлера, подтвердившее эффект разбиения волны цунами на короткие солитоноподобные волны для реальных условий распространения волны цунами в Малаккском проливе. Наблюдения коротко-масштабных волн большой амплитуды, имеющих квази-солитонную структуру, отмечались во время последнего катастрофического цунами 2004 года в Индийском океане; они интерпретируются в рамках сделанных расчетов.

Авторы: Е.Н. Пелиновский, Т.Г. Талипова, А.И. Зайцев (ИПФ РАН), Grue J. (Norway), Ioualalen (France), Choi (Korea)

Аннотация. Волны цунами обычно рассматриваются как очень длинные волны (их длина 50-100 км велика по сравнению с глубиной 4 км), поэтому нет необходимости учитывать дисперсию волн на воде, определяемую отношением глубины к длине волны. Тогда основной расчетной моделью является, по существу, двумерное волновое уравнение, в которое входит переменная глубина океана. Это уравнение реализовано во всех существующих пакетах программ, включая нашу собственную. И оно является основным при моделировании цунами и прогнозировании цунами в будущем. Преимущества данной модели в ее быстродействии и грубости, она внедрена в оперативную практику прогнозирования цунами в США и Японии. Дисперсия ведет к образованию солитонов на теле длинной волны, и такие эффекты хорошо известны в теории волн на воде. Сейчас они начали наблюдаться в реальных событиях цунами, включая цунами 2004 года. Учет дисперсии в теоретических моделях проблемы не представляет, однако численно это пока невозможно реализовать, поскольку необходимо иметь очень маленькие пространственные шаги. На большой акватории ошибка быстро накапливается, поэтому эти модели еще очень в «зачаточном» состоянии. Поэтому пока рассматриваются в основном одномерные модели, когда рассматривается распространение волн вдоль луча (фактически без учета ширины лучевой трубки). Сразу же после цунами 2004 года было предположено, что дисперсионные эффекты важны именно для открытого океана, однако конкретные расчеты для Индийского цунами привели к отрицательному результату. Наша заслуга, что мы, по существу, выделили районы в океане, где дисперсия будет существенной (мелководные районы с протяженным шельфом). Этот теоретический анализ выполнен на основании старых работ, суммированных в книгах одного из авторов (Пелиновский) по цунами (1982 и 1996), который раньше не находил практического применения. Численные результаты, сделанные для мелководных районов подтвердили, что солитоноподобные возмущения возникают как в слабо нелинейной, так и в сильно нелинейной теории. Именно это и выставляется в качестве основного результата.

Публикации

1. Пелиновский Е.Н. Нелинейно-дисперсионная теория волн цунами: взгляд после катастрофического цунами в Индийском океане. *Нелинейные волны* ' 2006. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2007, 393-407.
2. Ioualalen, M., Pelinovsky, E., Asavanant, J., Lipikorn, R., and Deschamps, A. On the weak impact of the 26 December Indian Ocean tsunami on the Bangladesh coast. *Natural Hazards and Earth Science System*. 2007, v. 7, 141-147.
3. Choi, B.H., Kim, D.C., Pelinovsky, E., and Woo, S.B. Three-dimensional simulation of tsunami run-up around conical island. *Coastal Engineering*, 2007, vol. 54, No. 8, 618-629.
4. Choi B.H, Pelinovsky E., Jeon C.K. and Kim K.O. Effects of the bottom topography on tsunami propagation in the East (Japan) Sea *China Ocean Engineering*, 2008, vol. 22, No. 2, 277-290.
5. Grue, J., Pelinovsky, E. Fructus, D. Talipova, T., and Kharif C, Formation of undular bores and solitary waves in the Strait of Malacca caused by the 26 December 2004 Indian Ocean tsunami, *J. Geophys. Res.*, 2008, 113, C05008, doi:10.1029/2007JC004343.
6. Chernov A., Korytko A., Kostenko I., Pelinovsky E., Yalciner A., Zaytsev A. Modeling of a 1969'th Chilean tsunami in Pacific Ocean within nonlinear-dispersive theory of long waves. *Geophys. Research Abstracts*, 2009, vol. 11, EGU2009-2069.

2.9. В ходе экспедиции в сентябре 2007 г. с помощью СТД измерений зарегистрирован мощный внутренний прилив, распространяющийся от пролива Карские Ворота в Баренцево море. Внутренние волны усиливались встречным течением из Баренцева моря. Радиолокационные панорамы морской поверхности показали, что короткопериодные внутренние волны генерируются за внутренней борой. Результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными данными.

Авторы: Е.Г. Морозов, В.Т. Пака (ИО РАН), В.В. Баханов (ИПФ РАН)

Аннотация. Анализ данных измерений, выполненных в проливе Карские Ворота с помощью буксируемого прибора, показывает, что внутренние приливы в проливе имеют большую амплитуду. Они вызваны баротропным приливом, обтекающим донный порог. Волны распространяются по оси пролива в стратифицированном потоке, который изменяет их свойства. Из-за среднего потока, обтекающего донный порог, формируется гидравлический скачок, захваченный на восточном склоне. Смещение изопикн в скачке превышает 60 м.

Внутреннее приливно-отливное движение затрагивает всю толщу воды. В западной части пролива внутренний прилив усиливается, так как распространяется навстречу среднему потоку. Это взаимодействие с потоком сокращает длину волны и концентрирует энергию волны в меньшем пространственном масштабе и, следовательно, амплитуда волны увеличивается. Данный процесс приводит к нелинейному преобразованию, обрушению внутреннего прилива, формированию внутренней боры на заднем склоне волны и интенсивных короткопериодных внутренних волн, которые проявляются на морской поверхности. Пакеты короткопериодных внутренних волн, которые следуют за борой, зарегистрированы на радиолокационных изображениях морской поверхности.

Использованная для расчетов генерации и распространения внутренних приливов в проливе численная модель подтвердила наблюдаемые свойства внутреннего прилива. Полученные при численном моделировании параметры волны находятся в хорошем согласии с данными натурных наблюдений.

Публикации

1. Morozov, E. G., V. T. Paka, and V. V. Bakhanov (2008), Strong internal tides in the Kara Gates Strait, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L16603, doi:10.1029/2008GL033804.

2.10. Предложен и экспериментально апробирован алгоритм расширения частотного диапазона линейных гидроакустических антенн с ограничением на пространственный межэлементный шаг, основанный на использовании апертурного синтеза. Экспериментально определены предельные возможности апертурного синтеза в задаче определения пеленга и дальности до шумящего источника.

Авторы: П.И. Коротин, А.А. Родионов, В.И. Турчин

Аннотация. Одной из актуальных задач пассивной локации, которая может быть решена с помощью линейных гидроакустических антенн, является пеленгация узкополосного источника. Для любой антенной решетки имеется ограничение по частоте сверху, связанное с возникновением неоднозначности при оценке пеленга. Эта неоднозначность может быть преодолена за счет синтеза апертуры, возникающего при движении антенной решетки. Кроме того, метод апертурного синтеза позволяет существенно повысить пространственное разрешение линейной антенны.

Проведено теоретическое исследование метода апертурного синтеза для случая, когда спектр источника включает непрерывную часть и набор узкополосных компонент. Показано, что достижимое пространственное разрешение при оценке пеленга узкополосных компонент с помощью метода апертурного синтеза определяется шириной полосы источника и составляет $\frac{c}{V} \Delta f_0 / f_0$, где Δf_0 – ширина спектра источника на частоте f_0 , c – скорость звука, V – скорость движения антенны. Примеры экспериментальной функции неопределенности синус пеленга – дальности приведены на рис. 1.

На экспериментальных данных продемонстрировано, что неоднозначность определения пеленга с помощью разреженной линейной антенны может быть снята при времени синтеза $T_0 = d/V$, где d – межэлементное расстояние разреженной антенны. На рис. 2а показана зависимость текущего пеленга на источник от времени, полученная с помощью разреженной антенны без использования апертурного синтеза. На рис. 2б показана аналогичная зависимость, полученная с использованием апертурного синтеза. Видно, что неоднозначность оценки пеленга надежно устраняется.

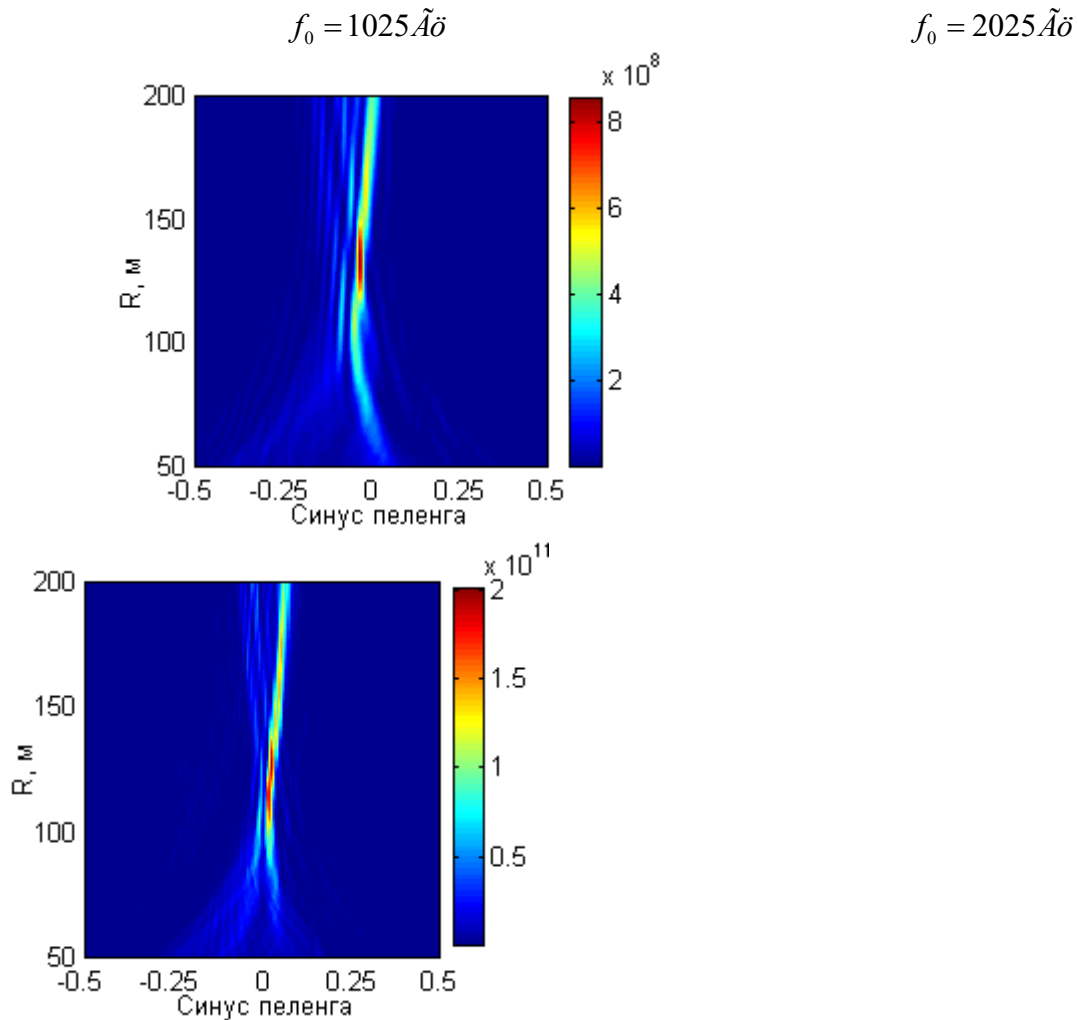


Рис. 1. Пример экспериментальной локализации источника по пеленгу и дальности с помощью метода апертурного синтеза.

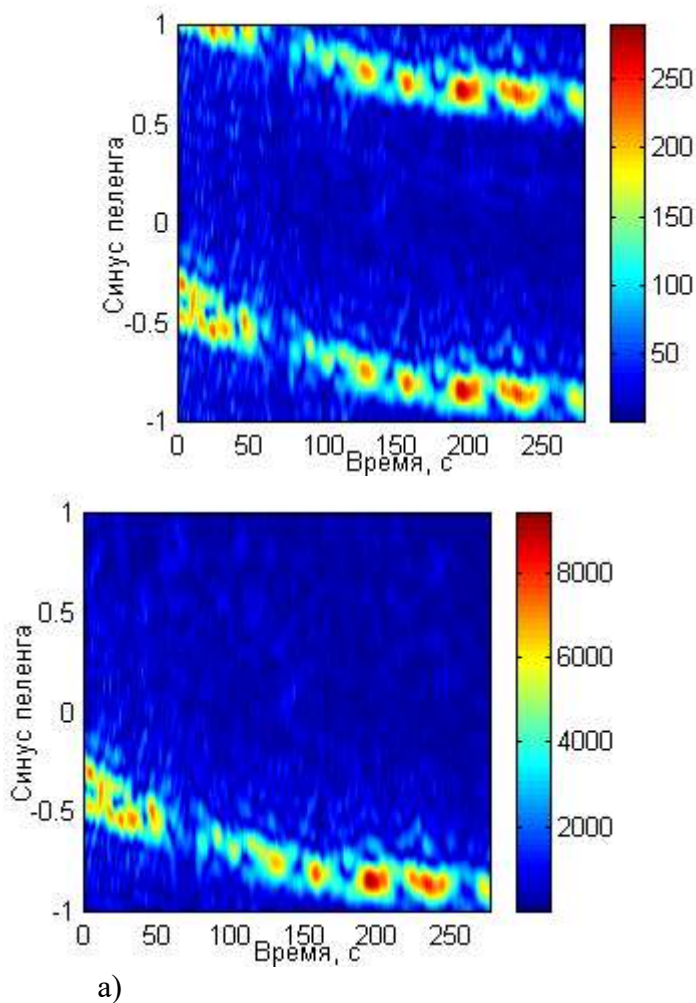


Рис. 2. Зависимости синуса текущего пеленга на источник от времени. (а) – используется антенная решетка с разреженной апертурой; (б) – используется антенная решетка с разреженной апертурой и апертурный синтез.

Публикации

1. Korotin P.I., Rodionov A.A., Turchin V.I. Bearing estimation of a source with complicated spectrum using a moving sparse antenna array. ", *Proc. VIIth Int. Conf. Ant. Theory and Technique*, Lviv, Ukraine, Oct. 6-9, pp. 151-153, 2009.

2.11. Для нелинейных акустических методов обнаружения трещин, основанных на использовании квадратичных эффектов, сформулированы физические критерии, определяющие предельную чувствительность обнаружения, которая ограничивается принципиально неустранимой фоновой решеточной нелинейностью среды. Выявлены сходство и различия между считающимся наиболее чувствительным резонансным нелинейно-модуляционным методом и известным линейным методом, основанным на измерении сдвигов резонансных частот образца при появлении в нем податливых трещиноподобных дефектов. Впервые для размера минимально обнаружимых этими методами трещин получены явные аналитические выражения, подтверждаемые сравнением с данными экспериментов. Указаны пути дальнейшего повышения чувствительности нелинейного подхода за счет перехода к нелинейным эффектам высших порядков.

Авторы: В.Ю. Зайцев, Л.А. Матвеев, А.Л. Матвеев

Аннотация. Определена предельная чувствительность нелинейно-акустических методов обнаружения трещин, основанных на наблюдении эффектов, обусловленных низшей (квадратичной) составляющей нелинейности дефектов. Детальный анализ проведен применительно к резонансному нелинейно-модуляционному методу, для которого эмпирическим путем было показано, что он является одним из наиболее высокочувствительных методов обнаружения трещин. Для такого нелинейного подхода сформулированы физические критерии предельной чувствительности, ограничиваемой принципиально неустранимой фоновой атомарной нелинейностью среды. Продемонстрирована тесная связь нелинейно-модуляционного подхода и известного линейного метода, основанного на измерении сдвигов резонансных частот образца при появлении в нем податливых трещиноподобных дефектов. Для размера минимально обнаружимых этими методами трещин впервые получены явные аналитические выражения, подтверждаемые сравнением с данными выполненных экспериментов. Показано, что для современной аппаратуры вклад фоновой решеточной нелинейности однородного материала становится определяющим фактором, ограничивающим предельную чувствительность всей группы методов, использующих квадратичные нелинейные эффекты. Указаны пути дальнейшего повышения чувствительности нелинейного подхода за счет перехода к нелинейным эффектам высших порядков.

Публикации

1. Зайцев В.Ю., Матвеев Л.А. “Предельная чувствительность нелинейно-акустических методов обнаружения дефектов в упругих средах: физические ограничения” Сборник Трудов XX сессии Российского акустического общества, 2008, Т.1, С. 133-136
2. V.Zaitsev, L.Matveev and A.Matveyev, Nonlinear-acoustic Damage Detection in Solid Samples: Comparison between Conventional Modulation Technique and Double-modulation, In: Nonlinear acoustics - fundamentals and applications, 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics (ISNA 18), Stockholm, Sweden 7 – 10 July 2008, AIP conference proceedings (Melville, New York, 2008), P. 581-584
3. V. Yu.Zaitsev, L.A. Matveev, A.L. Matveyev, On the ultimate sensitivity of nonlinear-modulation method of crack detection, NDT&E International, 2009, V.42, 622-629.

2.12. Рассмотрен механизм и экспериментально продемонстрирован обладающий гигантской акустической нелинейностью материал, созданный на основе резиноподобной среды-матрицы, содержащей небольшое количество микрополостей, характеризующихся пороговым поведением за счет наличия тонких (субмикронной толщины) упругих оболочек. Последние теряют устойчивость и проминаются по достижению некоторого порогового давления, при этом многократно увеличивая сжимаемость полости. В результате материал приобретает нелинейные свойства необычного знака – становится мягче при сжатии, причем уровень такой нелинейности может быть многократно выше, чем в случае известного «контрастно-мягкостного» механизма (как в случае жидкости с пузырьками газа или резиноподобной матрицы с безоболочечными полостями). Для квазистатического квадратичного параметра нелинейности созданного материала получены рекордные значения более 10^5 .

Авторы: В.Ю. Зайцев, Л.А. Матвеев (ИПФ РАН), A. Dyskin, E. Pasternak (University of Western Australia, Perth)

Аннотация. Теоретически рассмотрен механизм и экспериментально продемонстрирован реализующий его материал с гигантской акустической нелинейностью на основе резиноподобной среды матрицы, содержащей небольшое количество сферических микрометрового масштаба полостей, окруженных тонкими (толщиной от десятков до сотни нанометров) упругими оболочками. Последние демонстрируют пороговое поведение, теряя устойчивость формы и проминаясь по достижению некоторого порогового давления, при этом многократно увеличивая сжимаемость полости. В результате материал приобретает нелинейные свойства необычного знака – становится мягче при сжатии. Абсолютная величина параметра нелинейности такой пороговой природы может многократно превосходить значения, типичные для известного «контрастно-мягкостного» механизма нелинейности (как в случае жидкости с пузырьками газа или резиноподобной матрицы с безоболочечными полостями). Как величиной, так и знаком нелинейности, обусловленной новым механизмом, можно управлять, меняя величину среднего прилагаемого давления. Значения квазистатического квадратичного параметра нелинейности созданного материала продемонстрировали рекордные значения более 10^5 . При этом столь высокая нелинейность наблюдается не только при дифференциально малых изменениях упругих характеристик. Например, в созданном материале происходило уменьшение значения объемного упругого модуля на величину порядка 50% при создании сжимающей деформации порядка 10^{-5} , что не имеет аналогов среди свойств известных упругих сред.

Публикации

1. V. Yu. Zaitsev, A. Dyskin, E. Pasternak and L. Matveev, Microstructure-induced giant elastic nonlinearity of threshold origin: Mechanism and experimental demonstration, *Europhysics Lett.*, 86 (2009), 44005(1-6)
2. В.Ю. Зайцев, А. Dyskin, Л.А. Матвеев, Е. Pasternak, Пороговый механизм структурно-обусловленной акустической нелинейности на примере упругой слабо сжимаемой среды, содержащей микровключения с пороговым поведением, Сборник трудов всероссийской конференции Проблемы механики и акустики сред с микро- и наноструктурой: НАНОМЕХ-2009 (21-23 сентября 2009), Нижний Новгород, 2009, с. 62-66.

2.13. Показана применимость моделей модулированных волн на базе обобщенного нелинейного уравнения Шредингера (модели Диста) для описания интенсивных пакетов поверхностных гравитационных необрушивающихся волн. Используются данные лабораторных экспериментов и результаты полнонелинейных численных расчетов. Численное моделирование позволило исследовать режимы установления статистически равновесных состояний ансамблей волновых пакетов, что не удается в лабораторных экспериментах из-за недостаточной длины бассейна. Оценены пределы применимости модели огибающей для описания одиночных солитоноподобных групп интенсивных волн (до крутизны порядка $ka = 0.2$, где k – волновое число, и a – амплитуда).

Авторы: А.Б. Езерский, Е.Н. Пелиновский, А.В. Сергеева, А.В. Слюняев (ИПФ РАН), С. Kharif (Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre, France), L. Shemer (Tel-Aviv University, Izrael)

Аннотация. Исследование динамики и статистики интенсивных волн на поверхности глубокого моря важно для решения проблемы прогноза аномально высоких волн (freak waves, rogue waves). В настоящей работе выполнено сопоставление динамики интенсивных поверхностных гравитационных волн, рассчитанной в рамках моделей

оггибающей волн (классическое и модифицированное нелинейное уравнение Шредингера второго порядка – модель Диста с учетом нелинейных связанных волн), и полных уравнений гидродинамики, а также с данными лабораторных экспериментов (проведенных в бассейнах университетов Тель-Авива (Израиль), Ганновера (Германия) и Каена (Франция)). В частности:

- в рамках численного моделирования уравнений оггибающей и полных уравнений гидродинамики исследована динамика «предельных» солитонов оггибающей на глубокой воде (коротких волновых групп поверхностных волн, состоящих из 2-3 индивидуальных волн с крутизной, близкой к пределу обрушения) и показана их устойчивость при некоторых видах взаимодействия с другими волнами. Полученные результаты говорят о возможности применения концепции солитона оггибающей для сильно нелинейных однонаправленных волн на глубокой воде;

- исследованы эффекты возникновения и распространения интенсивных поверхностных волн на глубокой воде по результатам стохастического моделирования ансамблей групп волн с заданным начальным спектром в лабораторном эксперименте и в рамках численного моделирования. Показано хорошее соответствие между лабораторными измерениями и результатами расчета по моделям оггибающей волн (сопоставление профилей индивидуальных волн и усредненных по ансамблю величин), что позволяет рассчитывать нелинейную эволюцию волн на дистанциях, превосходящих длину лабораторного лотка (что для 300-метрового ганноверского бассейна соответствует порядку 70-80 длинам волн);

- с помощью полнонелинейного численного моделирования объяснен эффект возникновения модуляций стоячих волн, обнаруженный в лабораторных экспериментах по возбуждению мелкого резонатора, как результат выполнения условий трехволнового резонанса для существенно нелинейных волн. В рамках численной модели воспроизведены различные режимы стоячих волн, наблюдавшиеся в лабораторной установке. В рамках приближенной модели кноидальных волн сделаны оценки на критерий возбуждения модуляций, удовлетворительно согласующиеся с экспериментом.

Публикации

1. C. Kharif, E. Pelinovsky, A. Slunyaev, *Rogue Waves in the Ocean*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
2. А.В. Слюняев, Численное моделирование «предельных» солитонов оггибающей гравитационных волн на глубокой воде. *ЖЭТФ*, 2009, т. 136, вып. 4(10), 785-796.
3. A. Ezersky, A. Slunyaev, D. Mouazé, W. Chokchai, Occurrence of Standing Surface Gravity Waves Modulation in Shallow Water. *European J. of Mechanics B / Fluids*, 2009, V. 28(4), 521-531.
4. L. Shemer, A. Sergeeva, An experimental study of spatial evolution of statistical parameters in a unidirectional narrow-banded random wave field. *J. Geophys. Res.*, 2009, V. 114, C01015.
5. L. Shemer, A. Sergeeva, A. Slunyaev, Experimental and numerical study of evolution of statistical properties of unidirectional narrow-banded steep wave groups. Proceedings of the Workshop “*Rogue Waves 2008*” (Brest, France, Oct. 13-15, 2008) (Ed. M. Olagnon and M. Prevosto, Ifremer), 2009, 179-189.
6. L. Shemer, A. Slunyaev, B. Dorfman, Direct measurements of temporal wave field evolution in a laboratory tank and comparison with strongly nonlinear simulations. Proceedings of the Workshop “*Rogue Waves 2008*” (Brest, France, Oct. 13-15, 2008) (Ed. M. Olagnon and M. Prevosto, Ifremer), 2009, 191-198.
7. A. Slunyaev, A. Ezersky, D. Mouazé, W. Chokchai, Nonlinear modulations of standing long

gravity waves in a resonator. Proceedings of the Workshop “*Rogue Waves 2008*” (Brest, France, Oct. 13-15, 2008) (Ed. M. Olagnon and M. Prevosto, Ifremer), 2009, 209-218.

2.14. Проведено прямое численное моделирование динамики фонтана, формирующегося при проникновении вертикальной струи сквозь пикноклин в стратифицированной жидкости. Показано, что при числах Фруда, превышающих критическое значение, возникают автоколебания фонтана, сопровождающиеся генерацией внутренних волн в пикноклине. Выделено две моды автоколебаний с двумя различными порогами генерации. При числах Фруда, превышающих первое пороговое значение, фонтан совершает круговые движения в горизонтальной плоскости в окрестности центра струи, излучая внутренние волны в виде раскручивающихся спиралей. При числах Фруда, превышающих второе пороговое значение, верхушка фонтана хаотически «блуждает» в окрестности центра струи и периодически обрушивается, генерируя пакеты внутренних волн. Зависимость амплитуды колебаний верхушки фонтана от числа Фруда в численном моделировании хорошо согласуется с предсказанием теоретической модели конкуренции взаимодействующих мод в режиме мягкого самовозбуждения.

Авторы: О.А. Дружинин, Ю.И. Троицкая

2.15. На базе Воротиловской глубокой скважины (Нижегородская область) выполнен цикл измерений сигналов сейсмоакустической эмиссии в кристаллических породах Русской плиты на глубинах 3200 метров и 553 метра. Обнаружены краткосрочные интенсивные возмущения уровня эмиссии на фоне относительно спокойных периодов продолжительностью до нескольких дней. Регистрация волновых форм сигналов эмиссии в полосе до 5 кГц позволила проследить временную структуру отдельных импульсных возмущений и выделить в них фазы подготовки и развития, аналогичные фазам разрядки сейсмических напряжений. С использованием гидроакустического излучателя, установленного непосредственно в скважине и работающего в режиме излучения широкополосных ЛЧМ сигналов в диапазоне частот ~ 100 Гц, реализована схема когерентного межскважинного зондирования пород. Полученные результаты указывают на возможность использования Воротиловской глубокой скважины как уникального инструмента геодинамического мониторинга с использованием активных и пассивных методов геоакустики.

Авторы: И.Н. Диденкулов, А.И. Малеханов, А.П. Марышев, А.А. Стромков, О.Р. Фаизов, А.Н. Фокин, В.В. Чернов (ИПФ РАН), А.С. Беляков, В.С. Лавров (ИФЗ РАН), Ю.А. Власов, В.А. Гаврилов (ИВиС ДВО РАН)

Аннотация. Воротиловская глубокая скважина (ВГС) расположена в центре Пучеж–Катунской импактной структуры (астроблемы), возникшей около 165 млн. лет назад в результате падения крупного метеорита. Главная особенность структуры – локальное куполообразное поднятие пород кристаллического фундамента Русской плиты до глубины 400-600 метров от земной поверхности (т.н. Воротиловский выступ), в то время как характерная толщина чехла осадочных пород в этом регионе составляет ~2 км. Кроме того, ВГС находится на значительном удалении от крупных промышленных зон и транспортных узлов. Это указывает на уникальные возможности использования ВГС в целях геоакустического мониторинга на базе современных методов и средств скважинных измерений.

В кристаллических породах открытого ствола ВГС на глубине 3200 метров был установлен широкополосный геофон (оригинальная разработка ИФЗ РАН), измеряющий вертикальную компоненту вектора скорости ускорения в сейсмической волне на основе магнитоупругого эффекта. Аналогичный геофон установлен в открытом стволе скважины-

спутника (СС) на глубине 553 метра. С их помощью реализована система регистрации усредненных уровней сейсмоакустической эмиссии в четырех треть-октавных полосах (центральные частоты 30, 160, 500 и 1000 Гц, длительность усреднения 1 мин.) с передачей данных по каналу сотовой связи в лабораторию ИПФ РАН. Установлено, что сигналы в обеих скважинах практически свободны от техногенных помех и позволяют регистрировать естественный сейсмоакустический фон на горизонтах залегания кристаллических пород. Обнаружено, что уровни эмиссионного фона в обеих скважинах подвержены значительным флуктуациям импульсного характера, а именно, спокойные периоды, характеризующиеся отсутствием заметного уровня эмиссии на протяжении часов и до нескольких дней, сменяются сильными всплесками уровней во всех частотных полосах. Это свидетельствует о значительных вариациях в напряженно-деформированном состоянии кристаллических пород в районе Воротиловского выступа. Серия краткосрочных наблюдений полных (без усреднения) волновых форм эмиссии в полосе анализа 5 кГц позволила детально проследить временную структуру отдельных импульсных возмущений, включая фазы их подготовки и развития на различных глубинах. Подобные данные представляют особый интерес в качестве масштабной динамической модели разрядки сейсмических напряжений при землетрясениях. Формируемая база данных долговременных измерений на ВГС позволит провести сравнительный анализ с аналогичными данными скважинных измерений на Камчатке. Сопоставление таких данных представляется важным для установления общих и специфических черт геодинамических процессов в таком типичном асейсмичном и сейсмоактивном регионе как Русская равнина и Камчатский полуостров соответственно.

Выполнен оригинальный эксперимент по межскважинному зондированию пород Воротиловского выступа. В обсадную трубу ВГС на фиксированную глубину от 20 до 80 метров опускался гидроакустический излучатель электродинамического типа (оригинальная разработка ИПФ РАН). В скважину-спутник опускался перемещаемый по глубине до 500 метров (с шагом 20 метров) трех-координатный геофизический зонд. С его помощью контролировались уровни вертикальной и среднеквадратичной горизонтальной компонент зондирующего сигнала. Несмотря на резонансный характер самого излучателя (его резонансная частота в свободном пространстве составляет 140 Гц), в условиях скважины была реализована возможность излучения широкополосных сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) в полосе 100 – 180 Гц длительностью 12,8 с; излучались также ЛЧМ сигналы с девиацией 4 и 20 Гц той же длительности. Сигнал уверенно наблюдался на всех горизонтах установки излучателя и приемника с высоким отношением сигнал/шум (на уровне 40-50 дБ в зависимости от глубины приемника и поляризации сигнала). Реализованная методика межскважинного зондирования с использованием когерентного гидроакустического излучателя дает возможность добиться высокого пространственного разрешения.

Публикации

1. Диденкулов И.Н., Малеханов А.И., Марышев А.П., Стромков А.А., Чернов В.В., Беляков А.С., Лавров В.С., Власов Ю.А., Гаврилов В.А. Сейсмоакустический мониторинг в Воротиловской глубокой скважине: Первые результаты и перспективы // Акустика неоднородных сред: Ежегодник РАО. Труды научной школы проф. С.А. Рыбака. Вып. 9. – Троицк: Изд. "Тровант", 2008, с. 82-91.
2. Беляков А.С., Власов Ю.А., Гаврилов В.А., Диденкулов И.Н., Лавров В.С., Малеханов А.И., Стромков А.А., Фокин А.Н., Чернов В.В. Сейсмоакустический мониторинг в глубокой скважине // Сб. трудов XX сессии Российского акустического общества. Том 1. – М.: ГЕОС, 2008, с. 333-336.

3. Чернов В.В., Диденкулов И.Н., Малеханов А.И. Новый метод сейсмоакустической диагностики при скважинных измерениях // Там же, с. 350-353.
4. Диденкулов И.Н., Малеханов А.И., Стромков А.А., Чернов В.В., Беяков А.С., Лавров В.С., Власов Ю.А., Гаврилов В.А. Сейсмоакустический мониторинг в Воротиловской глубокой скважине // Материалы XIV Международной конференции «Связь поверхностных структур Земной коры с глубинными». Петрозаводск, 2008, с .171-172.

3. Отделение нелинейной динамики и оптики

3.1. В экспериментах по генерации ультрарелятивистских электронов плазменной волной, возбуждаемой при фокусировке мощного фемтосекундного лазерного импульса в струю гелия, получено ускоряющее напряжение 1 ГВ/см. Заряд электронов в пучке составил 10 пК, энергия электронов 200 МэВ, ширина энергетического спектра 10%, угловая расходимость пучка 2.5 миллирадиана. Достигнутые параметры близки к лучшим мировым результатам.

Авторы: В. Н. Гинзбург, В. В. Зеленогорский, Е. В. Катин, А. В. Кирсанов, В. В. Ложкарев, Г. А. Лучинин, А. Н. Мальшаков, М. А. Мартьянов, О. В. Палашов, А. К. Потемкин, А. М. Сергеев, А. А. Соловьев, М. В. Стародубцев, Е. А. Хазанов, А. А. Шайкин, И. В. Яковлев.

Аннотация. В ИПФ РАН на базе лазерного петаваттного лазерного комплекса создана установка по ускорению электронов мощным фемтосекундным лазерным импульсом. Ускорение осуществляется при фокусировке лазерного излучения на длине волны 910 нм, длительностью 40-50 фс, с энергией несколько десятков Джоулей на переднюю границу газовой струи диаметром 2 мм. За счёт высокой интенсивности оптического излучения происходит 100% ионизация газа. Ускорение электронов происходит за счёт положительного заряда области занятой ЭМ полем, с размерами 15 x 15 x 15 мкм (так называемая 3-D фокусировка). Скорость распространения оптического импульса в плазме несколько меньше скорости релятивистских электронов, поэтому максимальная длина на которой происходит ускорение электронов ограничена длиной дефазировки. В нашем случае эта длина соизмерима с диаметром газовой струи, что позволяет говорить о оптимальном режиме ускорения электронов. Данная схема не требует инъекции заряженных частиц, а суммарный заряд, энергетический и угловой спектр получаемых электронов, стабильны при использовании стабильного источника оптического излучения.

Такие источники ускоренных электронов могут найти применение в качестве каскада ускорения в многокаскадной схеме «оптического» ускорителя электронов, при создании лазеров на свободных электронах, а так же при проведении фундаментальных исследований взаимодействия оптического излучения с веществом (при взаимодействии релятивистских электронов с встречнонаправленным мощным оптическим излучением на несколько порядков уменьшаются интенсивности излучения, требуемые для рождения электрон/позитронной пары).

Параметры полученного пучка электронов сопоставимы с лучшими мировыми результатами в аналогичных схемах.

Публикации

1. Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Lozhkarev V.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Soloviev A.A., Starodubtsev M.V., Yakovlev I.V., Zelenogorsky V.V. Application of Petawatt pARametric Laser (PEARL) - Laser Wakefield Acceleration // AIP Conference Proceedings (First International Conference on Light at Extreme Intensities), October 16-21, 2009, Brasov, Romania, 2009, p.55.
2. Soloviev A.A., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Lozhkarev V.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A. K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Starodubtsev M.V., Yakovlev I.V. Experimental investigation of PW laser pulse - gas target interaction // Russian-French-German Laser Symposium 2009, 17-22 May, Nizhny Novgorod, Russia, 2009, P 171-172.

3. Yakovlev I.V., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Lozhkarev V.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Soloviev A. A., Starodubtsev M.V. Initial experiments on electron acceleration driven by OPCPA // CLEO /EUROPE-EQEC. June 14-19, Munich, Germany. 2009.
4. Shaykin A.A., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Lozhkarev V.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Soloviev A.A., Starodubtsev M.V., Yakovlev I.V., Zelenogorsky V.V. Electron acceleration by PEARL (Petawatt pArametric Russian Laser). // ILLA / LTL '2009. X International conference laser & laser information technologies & VI Symposium laser technologies & lasers. October 18–22, 2009. Smolyan, Bulgaria. 2009.
5. Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Lozhkarev V.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Soloviev A.A., Starodubtsev M.V., Yakovlev I.V., Zelenogorsky V.V. Petawatt OPCPA laser system and its applications in laser-plasma experiments // New optical Materials and Techniques. November 15–20, 2009. г. Шанхай, КНР. 2009.
6. Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Lozhkarev V.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Mironov I.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Soloviev A. A., Starodubtsev M.V., Yakovlev I.V., Zelenogorsky V.V. GeV-level electron beam accelerated by OPCPA laser // ULIS-2009, Frascati, Italy, INFN, 2009, p. 93.

3.2. Впервые осуществлена фазовая стабилизация частоты излучения источника миллиметрового/субмиллиметрового диапазона по эквидистантным компонентам широкополосного спектра, получаемого с помощью фемтосекундного лазера. Оптико-терагерцовое преобразование последовательности лазерных импульсов и ее смещение с миллиметровым/субмиллиметровым излучением осуществлено на диоде Шоттки. Продемонстрирована возможность создания принципиально нового поколения синтезаторов частоты, с субгерцовой шириной спектра излучения.

Авторы: М. Ю. Третьяков, А. П. Шкаев, А. М. Киселев, С. Б. Бодров, А. В. Андрианов, Д. С. Макаров

Аннотация. Прецизионные измерения в оптическом и инфракрасном диапазонах волн с помощью частотно-стабилизированных лазерных гребенок широко известны. Перенос этих методов в диапазон миллиметровых и субмиллиметровых (ММ/СубММ) волн (или в терагерцовую область спектра) затруднен, с одной стороны, из-за недостаточной эффективности оптико-терагерцовой конверсии в известных материалах и, с другой стороны, из-за общей сложности работы и с излучением этого промежуточного между радио и оптикой диапазона.

Потребность распространения лазерных методов в этот диапазон обусловлена, прежде всего, уникальной спектральной чистотой компонент лазерной гребенки, достигающей в лучших экспериментах субмиллигерцового уровня. С помощью систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) такая чистота спектра может быть распространена на излучение генераторов ММ/СубММ диапазона. Достижение столь высокой спектральной чистоты излучения в этом диапазоне другими методами в настоящее время не представляется возможным.

Наши эксперименты продемонстрировали возможность фазовой стабилизации частоты излучения серийной лампы обратной волны (ЛОВ типа ОВ-71) во всем диапазоне рабочих частот (78-118 ГГц) по спектральным составляющим высокостабильной гребенки

опорных частот, создаваемой излучением фемтосекундного лазера и возможность сканирования частоты ЛОВ в этом режиме между опорными линиями гребенки.

Гребенка опорных частот создавалась излучением Ti:Sa лазера с длительностью импульсов 50 фс. Частота повторения импульсов (91577000.000 Гц) стабилизировалась с помощью системы ФАПЧ по стандарту частоты и времени. Сигнал управления в полосе 0-250 Гц подавался на пьезокерамическое кольцо, позволяющее изменение длины резонатора лазера.

Перенос лазерной гребенки в ММ/СубММ диапазон (оптико-терагерцовая конверсия) осуществлена на серийном планарном СВЧ диоде Шоттки. Излучение лазера фокусировалось на полупроводник (GaAs) в контактной области диода, приводя к возникновению фотоиндуцированных пикосекундных импульсов тока носителей, спектр которых образует гребенку опорных частот вплоть до 1 ТГц. На этот же диод принималось излучение ЛОВ.

Наблюдаемые в эксперименте сигналы биений между 2-ой и 4-ой гармониками излучения ЛОВ, образующимися в диоде Шоттки и соответствующими компонентами гребенки в диапазоне 200 и 400 ГГц соответственно, подтверждают работоспособность метода во всем терагерцовом диапазоне. Ширина спектра излучения ЛОВ в режиме ФАПЧ составляла менее 10 Гц (ограничено полосой имеющегося в ИПФ анализатора спектра), что является на сегодняшний день абсолютным рекордом для таких источников.

3.3. Для диагностики злокачественных опухолей разработан эндоскопический прибор на основе метода кросс-поляризационной отражательной спектроскопии на оптическом волокне, сохраняющем поляризацию. Совместимость оптических зондов прибора (диаметр зонда 1.4 мм) с рабочими каналами стандартных эндоскопов (бронхоскопов, артероскопов и др.) делает слизистые оболочки полых органов, эндотелий сосудов, серозные оболочки полостей и суставов доступными для исследования методом кросс-поляризационной отражательной спектроскопии.

Авторы: В. А. Каменский, И. В. Турчин, А. Н. Морозов, А. В. Мяков, П. Д. Агрба, А. В. Жеглов, Н. М. Шахова.

Аннотация. Одним из самых перспективных методов обнаружения неопластических изменений в покровных тканях считается анализ информации о распределении по размерам и плотности ядер клеток эпителия, полученной по спектральным зависимостям рассеяния от эпителия. Однако применение данного подхода к изучению параметров живой биоткани затруднено, потому что информативная компонента рассеяния от эпителия замывается мощным диффузным фоном, приходящим из более глубоких слоев биоткани. Данная проблема в методе кросс-поляризационной отражательной спектроскопии (КПОС) решается применением так называемого поляризационного стробирования. Биоткань зондируется линейно поляризованным широкополосным излучением ближнего ИК диапазона. Прием обратно рассеянного излучения от биоткани осуществляется одновременно в двух поляризациях – исходной и ортогональной поляризациях зондирующего излучения. Использование поляризационного приема позволяет разделить рассеяние от эпителия и стромы, обладающих различной способностью к микродеполяризации.

С высокой степенью точности можно считать, что эпителий рассеивает зондирующее излучение преимущественно вперед без изменения поляризации. Элементарным рассеивателем в строме является двумерная структура - коллагеновое волокно, что существенно отличает строму от эпителия. По мере распространения в строме зондирующее излучение претерпевает многократное рассеяние и быстро деполяризуется. Фактором, обуславливающим быструю деполяризацию в строме,

является микродеполяризация на коллагеновых волокнах. Излучение, рассеянное от стромы, полностью теряет исходную поляризацию и дает одинаковый вклад в прямой и ортогональный каналы. Вычитая сигнал ортогонального канала из сигнала прямого, можно полностью избавиться от диффузного фона, приходящего из глубоких слоев стромы и выделить информативную компоненту излучения, рассеянную эпителием. Оптический спектр данной компоненты определенным образом зависит от распределения размеров ядер клеток эпителия. Восстановление параметров эпителия проводится путем решения обратной задачи в рамках модели рассеяния от биоткани.

Для создания прибора с гибким эндоскопическим щупом было использовано одномодовое поляризационно-сохраняющее волокно типа PANDA. Выбор поляризационно-сохраняющего волокна позволяет использовать оптимальную самосогласованную систему подсветки биологической ткани и приема рассеянного излучения. Использование поляризационно-сохраняющего волокна позволило создать щуп, диаметром 1.4 мм, совместимый с любым эндоскопическим оборудованием.

Публикации

1. Агрба П.Д, Мяков А.В., Морозов А., Шахова Н.М., Каменский В.А. Эндоскопический кросс-поляризационный спектрометр-прибор для пункционной диагностики. Оптика и спектроскопия/принято к печати в 2010 г.
2. Mjakov A.V., Agrba P.D., Shakhova N.M., and Kamensky V.A. Polarization optical reflectometry: the technique for puncture diagnosis. SPIE 2007 vol. 6534. part 2, pp102-112.
3. Alexey Myakov, Linda Nieman, Lorenz Wicky, Urs Utzinger, Rebecca Richards-Kortum, Konstantin Sokolov Fiber optic probe for polarized reflectance spectroscopy in vivo: Design and performance, Journal of Biomedical Optics 7(3), 388–397 (July 2002)
4. Мяков А.В., Каменский В.А. Патент на полезную модель № 76207 "Устройство упругой поляризационной спектроскопии" от 05.03 2007
5. Мяков А.В., Каменский В.А. Патент на изобретение № 2292531 "Устройство упругой поляризационной спектроскопии" от 04.04 2005.

3.4. Предложено для повышения эффективности генерации высоких гармоник лазерного излучения в газах использовать частотные аномалии в сечениях свободно-связанных электронных переходов. На примере инертных газов теоретически показано, что для многоэлектронных атомов, обладающих гигантским резонансом в сечении фоторекомбинации, при оптимальном выборе длины волны лазерного излучения эффективность преобразования в высшие гармоники может быть на несколько порядков величины выше, чем для других атомов той же группы.

Авторы: Емелин М.Ю., Рябкин М.Ю. (ИПФ РАН), Манаков Н.Л., Саранцева Т.С., Фролов М.В. (ВорГУ), A.F. Starace (The University of Nebraska, Lincoln, США)

Аннотация. Практический интерес к явлению генерации высоких гармоник оптического излучения при взаимодействии мощных лазерных импульсов с газами обусловлен возможностями его использования для создания компактных источников когерентного излучения вакуумного ультрафиолетового диапазона и для получения аттосекундных импульсов. Такие источники к настоящему времени созданы в ряде физических лабораторий мира. Актуальными проблемами являются продвижение далее в рентгеновский диапазон и повышение яркости генерируемого излучения.

В основе эффекта генерации высоких гармоник интенсивного линейно поляризованного оптического излучения в газах лежит синхронизованное лазерным полем излучение электронов, отрываемых от атомов, ускоряемых оптическим полем и соударяющихся вновь с родительскими ионами. Важной особенностью спектра гармоник, генерирующихся в результате этого трехступенчатого процесса, является наличие высокоэнергетического плато, т.е. широкой области спектра, где вероятность генерации высокой гармоники слабо зависит от ее энергии. Ширина плато, определяемая пондеромоторной энергией электрона в лазерном поле, пропорциональна произведению интенсивности лазерного излучения на квадрат его длины волны. Возможности расширения плато в высокочастотную область за счет увеличения интенсивности лазерной накачки ограничены быстрым ростом скорости туннельной ионизации атомов с увеличением электрического поля лазерного импульса, в результате чего резко снижается количество атомов, участвующих в процессе генерации гармоник. Другой возможный путь получения более высокоэнергетичных гармоник, состоящий в использовании лазерных источников с большей длиной волны, имеет серьезные ограничения, связанные в первую очередь с тем, что интенсивность гармоник в этом случае должна быстро падать из-за более существенного расплывания электронных волновых пакетов на стадии свободного движения. Совместные теоретические исследования, проведенные сотрудниками ИПФ РАН, Воронежского госуниверситета (Россия) и Университета Небраски, Линкольн (США), показали, что в многоэлектронных атомах увеличение выхода высоких гармоник с ростом длины волны лазера накачки может быть получено за счет аномально высоких значений сечения свободно-связанных электронных переходов в определенных интервалах энергий свободных электронов.

В основу проведенных исследований была положена построенная авторами полуаналитическая теория, позволяющая строить количественное описание высокоэнергетического плато в спектре генерации высоких гармоник лазерного излучения в многоэлектронных атомарных газах с использованием экспериментальных данных по сечениям фотопоглощения или фоторекомбинации. На основе применения этого подхода к инертным газам теоретически показано, что эффективность преобразования частот лазерного излучения в вакуумный ультрафиолетовый диапазон в ксеноне может быть на несколько порядков величины выше, чем в других инертных газах. Это в данном случае обусловлено наличием гигантского резонанса в сечении свободно-связанного перехода в ксеноне в области энергий электронов порядка 100 эВ.

Публикации

1. Frolov M.V., Manakov N.L., Sarantseva T.S., Emelin M.Yu., Ryabikin M.Yu., and Starace A.F. Analytic description of high-energy plateau in harmonic generation by atoms: can harmonic yield increase with increasing laser wavelengths? // Phys. Rev. Lett. 2009. V.102, N24. Art. no. 243901.

3.5. Разработан цифровой голографический метод оптической когерентной томографии для трехмерной визуализации внутренней структуры биотканей с продольным пространственным разрешением в единицы микрон. Предлагаемый метод устраняет необходимость в поперечных сканирующих системах, свободен от присущего традиционному методу оптической когерентной томографии ограничения сверху на апертуру приема рассеянного излучения и в пределе имеет субволновое поперечное пространственное разрешение.

Авторы: Д. В. Шабанов, Г. В. Геликонов, В. М. Геликонов.

Аннотация. Реализована возможность получения в 3D формате ОКТ-изображений внутренней структуры сильно рассеивающих сред с микронным и субмикронным пространственным разрешением за счет двумерной голографической записи при приеме рассеянного света на ряде длин волн в диапазоне десятки нанометров и цифровом способе восстановления изображений. На основе двумерной цифровой записи ряда голограмм, полученных при определенных фазовых сдвигах, вычисляется комплексная форма поля в плоскости матрицы фотоприемников с последующим цифровым восстановлением изображения в 3D-формате. Повторение процедуры на ряде длин волн в диапазоне десятков нанометров с последующим усреднением позволяет потенциально реализовать ОКТ-изображение с субволновым поперечным пространственным разрешением.

Данный метод визуализации внутренней структуры объекта обладает рядом преимуществ по сравнению с корреляционным и спектральными вариантами метода ОКТ. Во-первых, широкополосный цифровой голографический метод записи рассеянного сигнала позволяет отказаться от применения поперечных сканирующих систем в ОКТ при 3-х мерной визуализации биотканей. Во-вторых, снимается ограничение на поперечное пространственное разрешение, которое может быть доведено до субволнового при использовании объектива с большой числовой апертурой, или при уменьшении размера пикселей матрицы. В-третьих, прием рассеянного излучения при голографической записи с большой апертурой позволяет повысить отношение сигнала к шуму.

При экспериментальной апробации впервые было получено полноценное 3-х мерное ОКТ-изображение глубинной слоистой структуры оптически мутного объекта на основе голографической записи с использованием перестраиваемого по длине волны источника ИК-излучения и цифровой реконструкции.

Публикации

1. Shabanov D.V., Geliknov G.V., Gelikonov V.M. Broadband digital holographic technique of optical coherence tomography for 3-dimensional biotissue visualization // Laser Physics Letters. - 2009. - V. 6, N. 10. - P. 753-758.

3.6. Обосновано утверждение, что искажающее молекулу статическое внешнее поле меняет лишь внешнюю симметрию задачи о внутренней динамике (свойства пространства, времени) при сохранении внутренней симметрии (свойства структуры). В частности, это позволяет строить описание эффектов Штарка и Зеемана для жестких и нежестких молекул на основе только принципов симметрии. Для нежестких молекул регулярные методы описания данных эффектов ранее отсутствовали.

Автор: Буренин А. В.

Аннотация. Симметрия задачи о внутренней динамике молекулы делится на внешнюю и внутреннюю. Первая характеризует свойства пространства и времени, а вторая – свойства молекулярной структуры в заданном электронном состоянии. Понятно, что когда молекула находится в постоянном магнитном или электрическом поле, она искажается. Возникает вопрос, что происходит при этом с симметрией. Фактически без какого-либо обсуждения молчаливо считается, что внешнее поле изменяет внешнюю симметрию задачи, но сохраняет внутреннюю симметрию. То есть, в случае жесткой молекулы сохраняется ее точечная группа, определяющая геометрию внутренних движений: По-видимому, в основе такого предположения лежит достаточно большая совокупность подтверждающих его чисто эмпирических фактов. При этом некорректен аргумент малости искажения молекулы в не очень больших полях для применения в этой области внутренней группы симметрии изолированной молекулы. Дело в том, что переход

от одной группы внутренней симметрии к другой не является плавным с точки зрения изменения описания при малых искажениях, а приводит к скачку. Например, разрушение точечной группы C_{2v} молекулы воды H_2O до минимально возможной C_s сопровождается скачком в значении статистической суммы в два раза из-за изменения ядерных статистических весов. Такой скачок должен иметь место при наложении уже сколь угодно малого внешнего поля. Однако он не наблюдается, причем статистическая сумма соответствует группе C_{2v} .

На самом деле наличие в жесткой молекуле нескольких эквивалентных направлений искажения приводит к тому, что при наложении внешнего поля появляется столько же эквивалентных минимумов эффективного ядерного потенциала. То есть, молекула становится нежесткой. Определяемые величиной искажения барьеры между минимумами ядерного потенциала могут быть так малы, что не будут оказывать заметного влияния на внутреннюю динамику. Но именно благодаря наличию нескольких минимумов, связанных преобразованиями точечной группы, не нарушается внутренняя геометрическая симметрия. Аналогичное положение имеет место и для исходно нежестких молекул. Но сохраняется уже расширенная точечная группа. В результате описание эффектов Зеемана и Штарка в жестких и в нежестких молекулах можно получить на основе только принципов симметрии [1-2]. Это описание строится более просто и при этом более строго по сравнению с традиционным (когда последнее можно получить результаты конечно совпадают). Здесь важно, что для нежестких молекул ранее регулярные методы описания вообще отсутствовали. Тот же механизм работает и в случае других внешних воздействий (скажем, при столкновениях молекул). Именно поэтому геометрическая внутренняя симметрия с успехом используется для описания прецизионных экспериментальных данных спектроскопии высокого разрешения.

Публикации

1. Буренин А.В. // Оптика и спектроскопия, 2008, т.105, 190-194.
2. Буренин А.В. // Оптика и спектроскопия, 2008, т.105, 885-891.
3. Буренин А.В. // УФН (послана в печать).

3.7. Впервые метод тройного лазерного резонанса применен для спектроскопии молекулы воды вблизи диссоциации. Анализ экспериментальных спектров проведен на основе вариационных расчетов. Определены энергии 366 колебательно-вращательных уровней в 44 колебательных состояниях в неисследованном ранее энергетическом диапазоне $35500 - 41100 \text{ см}^{-1}$, т.е. вплоть до первого порога диссоциации $H_2O \rightarrow H + OH$ ($41145.94 \pm 0.15 \text{ см}^{-1}$).

Авторы: Зобов Н.Ф., Ширин С.В., Полянский О.Л. (ИПФ РАН, отд 380), O.V. Boyarkin, M. Grechko, P. Maksytenko, T. R. Rizzo (Политехнический институт Лозанны, Швейцария), L. Lodi, J Tennyson (Университетский Колледж Лондона, Англия), G. Császár (Университет Будапешта, Венгрия).

Аннотация. Вода является одной из самых важных молекул во вселенной, участвуя в большом количестве фотохимических и фотофизических процессов на Земле и других планетах, на солнце, в атмосферах холодных звезд. Как основной поглотитель солнечного излучения водяной пар играет центральную роль в термическом балансе земной атмосферы. Как одна из простейших многоатомных молекул вода является пробным объектом для разработки новых теоретических методов описания молекулярных спектров.

Несмотря на огромный прогресс в молекулярной спектроскопии наши знания о спектре водяного пара в течение 20 лет оставались ограничены видимым диапазоном и верхней границей по энергии для определенных из эксперимента уровней молекулы воды являлась величина около 26000 см^{-1} . Это было связано с тем, что чувствительности Фурье спектрометров в УФ диапазоне не хватало для наблюдения слабых переходов водяного пара. Продвижению в высокочастотный диапазон препятствовали и сложности с теоретическими предсказаниями энергий высоко возбужденных уровней. С 2007 года в политехническом институте Лозанны (Швейцария) начали использовать технику двойного лазерного резонанса для наблюдения нескольких переходов в высоко возбужденные колебательно-вращательные состояния H_2O в основном электронном состоянии в диапазоне конечных состояний $27500 - 34200\text{ см}^{-1}$. Там же при помощи тройного лазерного резонанса впервые определено экспериментальное значение энергии диссоциации молекулы воды – $41145.94 \pm 0.15\text{ см}^{-1}$ и измерены значения энергий уровней вплоть до этого порога.

Идентификация экспериментальных спектров была проведена в ИПФ РАН с использованием разрабатываемых уже более 15 лет вариационных методов расчетов спектров трехатомных молекул. Возможности теории в описании экспериментальных данных в недоступном ранее диапазоне энергий позволили провести исследование связанных состояний молекулы воды с энергиями в диапазоне $35500 - 41100\text{ см}^{-1}$, т.е. вплоть до первого порога диссоциации $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H} + \text{OH}$. Идентификация спектров тройного лазерного резонанса была проведена с использованием результатов вариационных расчетов.

В основу расчетов были положены набор программ DVR3D и вновь полученная методами квантовой химии (*ab initio*) поверхность потенциальной энергии, имеющая правильное поведение вблизи порога диссоциации. Интенсивности переходов, участвующих в схеме тройного резонанса, рассчитывались с помощью *ab initio* поверхности дипольного момента [L. Lodi, R.N. Tolchenov, J. Tennyson, A. E. Lynas-Gray, S.V. Shirin, N.F. Zobov, O.L. Polyansky, A.G. Csaszar, J.N.P. Van Stralen, L. Visscher, A new *ab initio* ground state dipole moment surface for water, *J. Chem. Phys.*, 128, 044304 (2008)].

В результате идентификации экспериментального спектра впервые определены энергии 366 колебательно-вращательных уровней энергии в 44 колебательных состояниях в диапазоне $35500-41100\text{ см}^{-1}$ выше основного состояния молекулы воды.

Успехи теории показали, что, используя разработанные нами методы, возможно идентифицировать экспериментальные переходы вплоть до диссоциации молекулы воды, а также разобраться в природе острых резонансов, лежащих выше энергии диссоциации.

Публикации

1. O.V. Boyarkin, M. Grechko, P. Maksytenko, T. R. Rizzo, N. F. Zobov, S.V. Shirin, A. G. Császár, L. Lodi, B.C. Silva, J. Tennyson, and O. L. Polyansky, *Rovibrational spectroscopy of water up to and beyond its first dissociation limit*, 21 Colloquium on High Resolution Molecular Spectroscopy, Italy, 2009.
2. M. Grechko, P. Maksytenko, O.V. Boyarkin, T. R. Rizzo, N. F. Zobov, S. V. Shirin, J. Tennyson, L. Lodi, A. G. Császár and O. L. Polyansky, *State-selective spectroscopy of water up to its first dissociation limit*, *Journal of Chemical Physics*, принята в печать.

3.8. Впервые в кубическом кристалле с ориентацией [110] экспериментально зарегистрирован эффект уменьшения термонаведенной деполяризации лазерного пучка при увеличении мощности тепловыделения. Показано, что деполяризация в кристалле с ориентацией [110] может быть значительно меньше, чем в используемых в настоящее

время кристаллах с ориентациями [001] и [111]. Эффект имеет принципиальное значение при выборе ориентации лазерных кристаллов для лазеров с большой средней мощностью.

Авторы: И.Б. Мухин, О.В. Палашов, Е.А. Хазанов

Аннотация. Экспериментально исследована деполяризация в кристалле тербий-галлиевого граната (ТГГ) с ориентацией [110] при относительно высокой мощности тепловыделения.

Впервые экспериментально продемонстрирован эффект уменьшения термонаведенной деполяризации лазерного пучка при увеличении мощности тепловыделения. В частности, в кристалле ТГГ длиной 6 см и диаметром 8.3 мм, получено уменьшение деполяризации с 10 % до 3 % при увеличении мощности тепловыделения с 4 до 7 Вт (средняя мощность лазера 300 Вт, диаметр пучка менее 1мм). Экспериментально показано, что при увеличении тепловыделения оптимальной ориентацией становится [110] при условии, что диаметр накачки больше диаметра пробного излучения в ~2 раза и значительно меньше диаметра кристалла. Результаты измерений качественно и количественно подтверждают правильность теории расчета деполяризации, развитой в работах [1,2].

Данный эффект имеет принципиальное значение при выборе ориентации лазерных кристаллов для лазеров с большой средней мощностью и может быть эффективно использован в кристаллических волокнах и дисковых активных элементах. В первом случае диаметр пробного излучения и источников тепловыделения принципиально значительно меньше полного диаметра волокна, во втором случае диаметр диска должен быть значительно больше диаметра рабочей области во избежание паразитной поперечной генерации (т.к. толщина диска меньше диаметра накачки).

1. I. Shoji and T. Taira, "Intrinsic reduction of the depolarization loss in solid-state lasers by use of a (110)-cut Y3Al5O12 crystal," Appl. Phys. Lett. 80, 3048-3050 (2002).

2 И.Б. Мухин, О.В. Палашов, Е.А. Хазанов, И.А. Иванов, "Влияние ориентации кристалла на тепловые поляризационные эффекты в мощных твердотельных лазерах", Письма в ЖЭТФ, 2005, т. 81, №3, с. 120-124.

Публикации

1. Ivan Mukhin, Oleg Palashov, Efim Khazanov, Reduction of thermally induced depolarization of laser radiation in [110] oriented cubic crystals, Optics Express, v. 17, № 7, 2009.

3.9. Разработан скоростной эндоскопический оптический когерентный томограф со сменными торцевыми зондами для получения изображения внутренней структуры оптически неоднородных биологических сред. Реализована скорость получения и отображения информации 8 кадров в секунду, что позволяет наблюдать в реальном времени внутреннее состояние и подвижность живой слизистой и серозной биологической ткани при эндоскопических исследованиях. Скоростной режим необходим для повышения диагностической эффективности метода оптической когерентной томографии в клинической практике.

Авторы: Г.В. Геликонов, С.Ю. Ксенофонов, С.В. Лесниченко, М.В. Никулина, В.Н. Ромашов, Д.А. Терпелов, П.А. Шилиягин, В.М. Геликонов.

Аннотация. В институте прикладной физики РАН продолжается совершенствование созданного в 1997 году оптического когерентного томографа,

основанного на корреляционном принципе, для наблюдения внутренней структуры поверхностных слоев биоткани. Прибор создан на основе волоконной оптики со сменным гибким торцевым многофункциональным эндоскопическим зондом и предназначен для использования в клинике. Быстродействие прототипа – один кадр за две секунды, недостаточно для решения некоторых, возникших на практике, задач. В частности, большее быстродействие необходимо при исследовании обширных участков биоткани. Кроме того, нерешенной задачей оставался контроль повторяемой степени сжатия мягких слизистых для наибольшей глубины наблюдения, что не удавалось сделать при медленном сканировании. В разработанном скоростном варианте оптического когерентного томографа быстродействие по сравнению с прототипом повышено в 16 раз. Эффект достигнут за счет разработки уникального пьезоволоконного оптического модулятора, изменяющего оптический путь со скоростью около 5 метров в секунду, поддерживаемой с точностью лучше 1%, и с амплитудой в единицы миллиметров. Реализованная скорость получения и отображения информации – 8 кадров в секунду позволяет наблюдать в реальном времени внутреннее состояние и подвижность исследуемой живой слизистой и серозной биологической ткани при эндоскопических исследованиях. Скоростной режим перспективен в плане повышения диагностической эффективности метода оптической когерентной томографии. Новый томограф, разработанный для медицинской эндоскопической диагностики, не имеет аналогов в мировой практике.

Публикации

1. Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Терпелов Д.А., Шилягин П.А. "Система управления оптической линией задержки", 14 Нижегородская сессии молодых ученых (физика, химия, медицина, биология) 19-24 апреля 2009 г.
2. В.М. Геликонов, Г.В. Геликонов, С.Ю. Ксенофонтов, Д.А. Терпелов, П.А. Шилягин "Система управления пьезоволоконным модулятором оптического пути ", Приборы и техника эксперимента", 2009 (направлена в печать).

3.10. Для создания пикосекундного лазера с киловаттной средней мощностью разработан криогенный (77К) лазерный усилитель на диске из кристалла Yb:YAG толщиной 600мкм с дополнительным отводом тепла через оптическую поверхность при помощи сапфира. Коэффициент усиления за шесть проходов через усилитель составил 8, и энергия выходного импульса 30мДж. За счет дисковой геометрии и охлаждения до азотных температур при непрерывной диодной накачке мощностью 450Вт тепловые искажения были полностью подавлены, что открывает возможности для дальнейшего масштабирования.

Авторы: И.Б. Мухин, О.В. Палашов, Е.А. Хазанов Вяткин А.Г., Перевезенцев Е.А.

Аннотация. Разработан ключевой элемент криогенного дискового лазера – квантовый криогенный дисковый усилитель на кристалле Yb:YAG (толщина 600мкм, ориентация [001], допирование 10%). надежно работающий при непрерывной диодной накачке с диаметром пучка 6мм и мощностью до 450Вт. Величина термодеполяризации составила ~0,1%. Торцевой теплоотвод осуществлен через индий на цилиндр из сплава медь-вольфрам, охлаждаемый жидким азотом.

В импульсно-периодическом режиме (параметры накачки: пиковая мощность 400Вт, длительность импульса 1.2 мс, частота следования импульсов до 150Гц) для диаметров пучков 3мм получено усиление по слабому сигналу 2.4 и реализована схема шести проходного усилителя с суммарным коэффициентом усиления 8 и энергией в

выходном импульсе 30мДж. Дополнительный теплоотвод через оптическую поверхность при помощи сапфира позволил удвоить мощность.

Создана теоретическая модель, учитывающая насыщение лазерного перехода и перехода накачки, спектральные характеристики накачки (форму, ширину, центральную частоту), усиленное спонтанное излучение и позволяющая рассчитать оптимальную концентрацию ионов иттербия. Модель также включает температурную зависимость коэффициента теплопроводности, показателя преломления и коэффициента теплового расширения. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными и показывают возможность создания при мощности накачки 1кВт Yb:YAG лазера с частотой повторения 1кГц и энергией 250мДж в импульсе длительностью 20пс.

3.11. Установлены особенности перехода к пространственно однородному режиму генерации полей в нелинейных сильно диссипативных средах. На примере параметрического возбуждения капиллярных волн на поверхности тонкого слоя вязкой жидкости экспериментально показано, что в нелинейных сильно диссипативных неравновесных средах возможно явление конкуренции двумерных доменов сложной формы, заполненных периодическими решетками волновых полей. Динамика конкурирующих доменов определяется движением фронтов на их границах, что приводит к увеличению площади одних доменов за счет вытеснения других.

Авторы: Кияшко С. В., Назаровский А. В.

Аннотация. Известно, что в нелинейных сильно диссипативных неравновесных средах, таких как термоконвекция Релея-Бенара, электродинамическая конвекция в жидких кристаллах, параметрически возбуждаемая капиллярная рябь на поверхности вязкой жидкости возможно установление пространственных структур в виде роликов. В протяженных двумерных системах в процессе возникновения генерации в разных областях пространства могут возбуждаться домены, заполненные периодическими решетками полей с различной ориентацией, а переход к пространственно однородному режиму при этом возможен только в результате взаимодействия доменов.

На примере параметрического возбуждения капиллярных волн на поверхности тонкого слоя вязкой жидкости экспериментально установлено, что в нелинейных сильно диссипативных неравновесных средах возможно явление конкуренции двумерных доменов сложной формы, заполненных периодическими решетками волновых полей. В зависимости от начальных и граничных условий в процессе генерации могут возникать домены различной формы и различные сценарии их конкуренции.

Показано, что динамика конкурирующих доменов определяется движением фронтов на их границах, что приводит к вытеснению одних доменов другими и увеличению занимаемой ими площади.

Экспериментально показано, что для прямоугольной формы границ могут быть найдены все возможные сценарии для движения доменов в виде сложных многоугольников, что позволяет с помощью задания начальных и граничных условий задавать нужный сценарий перехода к пространственно однородному режиму генерации.

Публикации

1. S.V. Kiyashko, A.V. Nazarovsky, Dynamics of Roll Structures at Parametric Excitation of Capillary Waves, Selected Papers of International Conference "Fluxes and Structures in Fluids –2007", Institute for Problems in Mechanics of the RAS, Moscow, 2008, pp.109-111.

2. Кияшко С. В., Динамика роликовых доменов параметрически возбуждаемых капиллярных волн, Известия вузов. Радиофизика. Том LI, №4, 2008, С.359-366.

3.12. Показано, что наблюдаемый в эксперименте астигматизм тепловой линзы в одноосных кристаллах определяется фотоупругим эффектом. Впервые теоретически объяснены многочисленные парадоксальные результаты измерений тепловой линзы и на примере кристалла $YLiF_4$ показано, что не только астигматизм, но и сферическая составляющая тепловой линзы существенно зависит от фотоупругого эффекта.

Авторы: Зеленогорский В.В, Е.А. Хазанов

Аннотация. Основным ограничением роста средней мощности твердотельных лазеров с расходимостью близкой к дифракционной являются тепловые эффекты в активных элементах: тепловая линза и деполяризация. Анизотропные кристаллы имеют существенное преимущество перед изотропными, т.к. в них практически отсутствует деполяризация излучения

Мы полагаем, что фотоупругий эффект является эффектом, который способен влиять не только количественно, но и качественно менять тепловую линзу и его необходимо учитывать в расчетах термолинзы в одноосных кристаллах. В качестве конкретного примера в работе рассматривается одноосный кристалл YLF, который является сейчас одним из широко используемых в лазеростроении анизотропных кристаллов. Экспериментально, тепловая линза в стержнях Nd:YLF исследовалась в ряде работ как с боковой накачкой, так и с торцевой. Для обеих собственных волн экспериментально наблюдался сильный астигматизм тепловой линзы, причем опубликованные данные в различных статьях существенно разнятся. Несмотря на столь большой объем экспериментальных исследований, хотя бы качественное объяснение астигматизма тепловой линзы в Nd:YLF в этих работах не приводится.

В данной работе проведен строгий расчет тепловой линзы в стержне из кристалла YLF (а-срез) с учетом анизотропий теплопроводности, упругости, линейного расширения и показателя преломления. Доказано, что пренебрегая фотоупругим эффектом, невозможно даже качественно объяснить многочисленные экспериментальные данные. Показано, что вклад в тепловую линзу обыкновенной волны дают лишь три коэффициента фотоупругости (p_{11} , p_{13} , p_{16}), а необыкновенной – только два (p_{31} , p_{33}). Используя эти пять коэффициентов как подгоночные параметры, мы количественно объяснили все экспериментальные данные

Публикации

1. V.V. Zelenogorsky, "Thermal lens astigmatism in birefringence crystals," in Laser Optics 2008, St.Petersburg, Russia, 2008.
2. V.V. Zelenogorsky and E. A. Khazanov, "Thermal lens astigmatism in birefringence crystals," in Advanced Solid-State Photonics (ASSP-2009), Denver, Colorado, 2009, p. WB20
3. V.V. Zelenogorsky and E. A. Khazanov, "Influence of photoelastic effect on thermal lens in YLF crystal," Quantum Electronics, (принята к печати).

3.13. Получены прецизионные экспериментальные данные о профиле полосы поглощения в окрестности частоты 60 ГГц атмосферного кислорода в диапазоне температур от -28 С до $+60$ С. Достигнутая точность позволила впервые определить количественный вклад эффекта столкновительной связи молекулярных линий до второго

порядка по давлению включительно. Полученные данные представляют ценность для развития теории межмолекулярного взаимодействия, а также позволяют в 2-3 раза повысить точность моделирования поглощения миллиметровых волн атмосферным кислородом, что имеет большое значение для задач дистанционного зондирования атмосферы.

Авторы: Д.С. Макаров, М.Ю. Третьяков (ИПФ РАН), P.W. Rosenkranz (MIT, USA)

Аннотация. Молекулярный кислород вносит основной вклад в поглощение атмосферой излучения мм-диапазона. Переходы тонкой структуры молекулярного кислорода сгруппированы вблизи частоты 60 ГГц и образуют при атмосферном давлении единую полосу поглощения. Знание точных параметров спектральных линий тонкой структуры и формы контура полосы поглощения востребовано для решения прикладных задач (мониторинг атмосферы, восстановление температурного профиля), а также представляет фундаментальный интерес для развития теории межмолекулярных взаимодействий.

При давлениях порядка атмосферного, в результате проявления эффекта столкновительной связи (называемого также эффектом интерференции) молекулярных спектральных линий контур полосы сильно отличается от суммы контуров составляющих ее линий. Несмотря на сложность математического описания указанного эффекта, его вклад в форму контура полосы поглощения может быть представлен в виде убывающего ряда, слагаемые которого пропорциональны степеням давления газа. В широко используемой в мире для атмосферных приложений модели Millimeter-wave Propagation Model (MPM) описание проявления эффекта столкновительной связи линий ограничено лишь первым порядком по давлению. В нашей предшествующей работе 2005 г. (J. Mol. Spectr., v.231, p.1, 2005) было показано, что такая модель не описывает профиль 60-ГГц полосы поглощения, наблюдаемый в эксперименте, с точностью до шумов. В то же время, из-за малости поправок второго порядка и недостаточно высокого соотношения сигнал/шум в том эксперименте, расширить количественное описание эффекта столкновительной связи линий не представлялось возможным.

Нами было проведено прецизионное исследование профиля полосы поглощения молекулярного кислорода вблизи частоты 60 ГГц в диапазоне температур от -28 °С до $+60$ °С. Использовался резонаторный спектрометр, чувствительный элемент которого помещен в климатическую камеру, позволяющую стабилизировать температуру исследуемого газа с точностью до 0.2 °С. Примененные в ходе исследования методики получения и обработки данных позволили уменьшить влияние возможного дрейфа температуры исследуемого газа и элементов резонатора. Полученные в результате эксперимента зависимости коэффициента поглощения от частоты обладают достаточно высоким отношением сигнал/шум для исследования проявления эффекта столкновительной связи линий до второго порядка по давлению включительно. Параметры столкновительной связи второго порядка были определены с помощью метода расчета, разработанного Ф. Розенкранцем (P.W. Rosenkranz). Кроме того, были уточнены параметры столкновительной связи первого порядка. Зависимости рассчитанных параметров от температуры гладкие, что подтверждает высокое качество экспериментальных данных и адекватность используемого описания.

В результате проведенного исследования точность количественного описания профиля полосы поглощения молекулярного кислорода вблизи 60 ГГц с учетом проявления эффекта столкновительной связи линий во втором порядке составляет примерно 1% (декларируемая авторами точность модели MPM, учитывающей проявление эффекта столкновительной связи только в первом порядке составляет 2-3%).

Публикации

1. D.S. Makarov, M.Yu. Tretyakov, M.A. Koshelev and V.V. Parshin. Investigation of the millimeter-wave atmospheric oxygen spectra by means of the resonator spectrometer. Abstracts of the XVI-th Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy HiRus2009, July 5-10, Tomsk, Rep. R6. p.172, 2009.

3.14. Разработан и экспериментально апробирован метод когерентного сложения выходного излучения многоканальных волоконно-лазерных усилителей с помощью резонансно-оптического управления показателем преломления волокна, легированного редкоземельными ионами. Изменение показателя преломления управляемого волокна происходит вследствие возбуждения (или релаксации) ионов, индуцированного волной накачки (или истощения населённости). Предложенный метод когерентного сложения обеспечивает низкий уровень шума, высокое быстродействие и позволяет создавать полностью волоконную лазерную систему.

Авторы: Антипов О.Л. (ИПФ РАН), Фотиади А.А. (ФТИ РАН, С. Петербург; Университет Монса, Бельгия), Megret P. (Университет Монса, Бельгия)

Аннотация. В последние годы в мире созданы новые твердотельные лазеры, способные генерировать пучки излучения высокого качества со средней по времени мощностью более 100 кВт. Большинство существующих проектов дальнейшего увеличения мощности твердотельных лазеров с сохранением высокого качества их пучков предусматривает использование когерентного сложения излучения нескольких одномодовых лазерных каналов (полностью волоконных или твердотельных, или комбинированных). Поэтому, разработка методов когерентного сложения пучков излучения твердотельных и волоконных лазеров привлекает значительный интерес исследователей.

Метод когерентного сложения, разработанный в ИПФ РАН и ФТИ РАН, основывается на использовании изменения показателя твердотельной или волоконно-лазерной среды (кристаллов или стёкол, активированных редкоземельными ионами) при её накачке или истощении инверсии населённости резонансной волной. Проведённые исследования показали, что эффект изменения показателя преломления в алюмосиликатных или фосфоросиликатных активированных световодах (которые используются в качестве активной среды волоконных лазеров) под действием резонансной волны накачки или насыщения (снимающей инверсную населённость), обусловлен в основном различием поляризуемости возбуждённых и невозбуждённых ионов активатора (Yb^{3+} , Tm^{3+} , Nd^{3+} и других). Характерное время изменения показателя преломления определяется мощностью резонансной волны и параметрами активной среды (временем жизни возбуждённых ионов, шириной линии поглощения или усиления, и т.д.).

Экспериментально исследовано когерентное сложение излучения двух эрбиевых волоконных усилительных каналов, в которые вводилось излучение общего задающего генератора на длине волны 1550 нм. Функцию управляемого элемента в системе выполняло дополнительное лазерное волокно, активированное ионами Yb^{3+} . Управление показателем преломления иттербиевого волокна осуществлялось излучением накачивающей волны (на длине волны 980 нм) и волны насыщения (на длине волны 1064 нм). Оптический сигнал управления (в цепи обратной связи) поступал на фотоприёмник из холостого плеча интерференционного делителя, а затем электрический сигнал через электронный контроллер менял ток питания диодно-лазерных генераторов управляющих волн (на длинах волн 980 нм и 1060 нм). Использование алгоритма амплитудной модуляции управляющего сигнала и синхронного детектирования в цепи обратной связи обеспечивало её высокое быстродействие. В результате проведённого эксперимента

удалось обеспечить компенсацию акустических шумов (в полосе более 10 кГц), что привело к когерентному сложению излучения двух волоконных усилителей с эффективностью ~95%. Проведённые оценки указывают на возможность использования (через временное мультиплексирование) всей доступной полосы системы управления фазой, что позволит увеличить число фазируемых волоконно-лазерных каналов до 50-100.

Предложенный метод резонансно-оптического управления обеспечивает более низкий уровень шума и большее быстродействие (по сравнению с известным ранее методом механических деформаций волокна), а в отличие от электрооптического управления позволяет создавать полностью волоконную лазерную систему.

Публикации

1. A.A. Fotiadi, O.L. Antipov, and P. Mégret, "Dynamics of pump-induced refractive index changes in single-mode Yb-doped optical fibers," *Optics Express* v.16, p.12658, 2008.
2. О.Л. Антипов, А.А. Фотиади, С.И. Степанов, Р. Мегрет, "Эффект изменения показателя преломления в активных световодах и его применение," *Фотоника* т.3, вып. 9, с. 20-21, 2008.
3. A.A. Fotiadi, N.G. Zakharov, O.L. Antipov, P. Mégret, "All-fiber Coherent Combining of Er-doped Amplifiers through Refractive Index Control in Yb-doped Fibers," *Optics Letters* v.34, 2009.
4. A.A. Fotiadi, N.G. Zakharov, O.L. Antipov, and P. Mégret, "All-Fiber Coherent Combining of Er-Doped Fiber Amplifiers by Active Resonantly Induced Refractive Index Control in Yb-Doped Fiber," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2008), CWB2.
5. A.A. Fotiadi, O.L. Antipov, P. Mégret, "All-fiber Coherent Combining of Er-doped Amplifiers through Refractive Index Control in Yb-doped Fibers," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe* (Munich, Germany, 14-18 June, 2009), CJ3.2 WED.

3.15. Экспериментально обнаружено существенное (в 5-7 раз) увеличение коэффициента поглощения ультразвука в суспензиях углеродных нанотрубок, по сравнению с суспензиями мелкодисперсных углеродных частиц с формой, близкой к сферической, и такой же массовой концентрацией частиц. Эффект может быть использован при разработке и создании звукопоглощающих материалов.

Авторы: А.Д.Мансфельд, А.Г.Санин, О.А.Санина, (ИПФ РАН),
Б.С. Каверин, А.М.Объедков (ИМХ РАН)

Аннотация. Исследованы коэффициенты поглощения ультразвука в суспензиях многостенных углеродных нанотрубок, помещенных в этиленгликоль. Нанотрубки имели характерные поперечные размеры порядка 20 нм и длину несколько микрометров. Измерения проводились на частотах 3 и 9 МГц при различных массовых концентрациях нанотрубок от 0.1 до 0.6%. В результате обнаружено, что коэффициент поглощения в суспензиях нанотрубок существенно (5-7 раз) превышает коэффициент поглощения углеродных мелкодисперсных частиц микронных размеров с формой, близкой к сферической. Подобное поведение коэффициента поглощения авторы связывают с возникновением вращательного движения несимметричных частиц и, соответственно, усилением влияния сдвиговой вязкости.

Публикации

1. А.Д.Мансфельд, А.Г.Санин, О.А.Санина, Б. С. Каверин, А.М.Объедков. Поглощение ультразвука в растворах нанотрубок. Акуст. журнал, 2010, №2 (принято к печати)

3.16. Предложен и апробирован новый метод анализа многоканальных данных активности нейронных систем мозга, основанный на построении корреляционного графа статистически достоверных путей прохождения сигналов. Метод позволяет определить принципиальные особенности функциональной архитектуры исследуемых сетей, включая ключевые элементы - “распределители” активности, замкнутые циклы передачи возбуждения в сети и характерные временные масштабы паттернов активности. Метод может использоваться для обработки широкого класса многоканальных записей в нейродинамике: импульсных сигналов активности модельных нейронных сетей, данных мультиэлектродных электрофизиологических зондов и флуоресцентных сигналов оптического имиджинга активности мозга.

Авторы: В.Б. Казанцев, Ю.В. Зайцев, И.В. Мухина

Аннотация. Одной из ключевых задач при исследовании нелинейных процессов в сетевых системах (в частности, в нейронных сетях мозга) является выявление механизмов генерации пространственно-временных структур активности и поиск адекватных методов их анализа. В нейросетях такие структуры активности представляют собой многоканальные записи сигналов с различных элементов сети (нейронов) или локальных участков ткани мозга, регистрируемые с помощью внеклеточных электродов. Связи между нейронами обеспечивают однонаправленную (синаптическую) передачу сигналов возбуждения от клетки к клетке с определенным временем задержки, определяемым скоростью передачи нервного импульса. Топология связей в сети может быть чрезвычайно сложной (полносвязанной) и априорно неизвестна. Кроме того, не все имеющиеся связи могут быть активными при генерации того или иного сигнала. Задачей анализа многоканальных данных, имеющихся в распоряжении исследователя, является восстановление топологии активных связей (функциональной архитектуры сети), описание и классификация на ее основе наблюдаемых сигналов активности.

Авторами предложен новый метод анализа многоканальных импульсных последовательностей, генерируемых нейросетями с априорно неизвестной топологией связей. Метод основан на построении направленного корреляционного графа, описывающего повторяющиеся пространственно-временные импульсные последовательности. Вершинами графа являются элементы сети (нейроны), задействованные в генерации наблюдаемого паттерна активности. Ребра графа отображают активные межэлементные связи с определенной временной задержкой, априорно неизвестной и детектируемой по пикам локальной кросс-корреляционной функции. Наличие статистически достоверных связей определяется по вероятности существования для каждого из событий сигнала-источника на определенной задержке. Пороговое значение этой вероятности рассчитывается как вероятность случайных совпадений из анализа суррогатных данных. Корреляционные графы позволяют определить характерные особенности функциональной архитектуры исследуемых сетей, включая: (1) ключевые элементы, “распределители” (в англ. hubs) активности, (2) замкнутые циклы передачи возбуждения в сети и (3) характерные временные масштабы пространственно-временных паттернов активности. Метод был верифицирован на модельной нейронной сети с заданной топологией связей и может применяться для широкого класса многоканальных данных в нейродинамике, включая записи

мультиэлектродных электрофизиологических зондов и флуоресцентные сигналы оптического имиджинга активности мозга.

Публикации

1. Yu.V. Zaytsev, V.B. Kazantsev Detecting repeating patterns in neural network activity with spike correlation graphs. *Physical Review Letters* 2009 (submitted).
2. V.B. Kazantsev, I.V. Mukhina, Yu.V. Zaytsev, M.O. Galkina Emergence of spiking activity in a network of synaptically coupled neurons with axonal delays, *IFAC Proceedings, Chaos'09 London*, 2009.
3. И.В. Мухина, В.Б. Казанцев, Л.Г. Хаспеков, М.В. Ведунова, Е.В. Митрошина, С.А. Коротченко, Е.А. Корягина. Динамика развития функциональной активности нейронной сети гиппокампа *in vitro* при культивировании на мультиэлектродной матрице MED64. Материалы XV Международной конференции по нейрокибернетике, 2009, стр. 123-127.

3.17. Разработана серия диагностических приборов со сменными торцевыми эндоскопическими зондами для клинической реализации метода оптической когерентной томографии – получения изображений приповерхностной структуры слизистых и серозных тканей внутренних органов человека. Модельный ряд включает приборы, позволяющие проводить поляризационно-чувствительные измерения, повышающие диагностическую ценность метода, приборы с тонкими зондами, совместимыми с широким классом медицинской эндоскопической аппаратуры, а также скоростной вариант эндоскопического томографа с отображением 8 кадров в секунду, который позволяет наблюдать в реальном времени внутреннее состояние и подвижность исследуемой живой биологической ткани.

Авторы: Г.В. Геликонов, С.Ю. Ксенофонтов, С.В. Лесниченко, М.В. Никулина, В.Н. Ромашов, В.М. Геликонов

Аннотация. В рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» на выполнение научно-исследовательских работ и опытно-конструкторских работ по теме: «Разработка технологий оптической томографии и выпуск опытных партий приборов для диагностики биологических тканей», разработана серия приборов для оптической когерентной томографии для получения в реальном времени изображений биотканей в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн на глубину до 2 мм с пространственным разрешением до 15 мкм, совместимой со стандартными эндоскопическими технологиями. В число модификаций входят приборы, позволяющие проводить поляризационно-чувствительные измерения с целью повышения диагностической ценности метода, приборы с новыми более тонкими зондами, которые совместимы с более широким классом медицинских эндоскопических приборов, а также скоростной вариант эндоскопического оптического когерентного томографа с отображением 8 кадров в секунду, который позволяет наблюдать в реальном времени внутреннее состояние и подвижность исследуемой живой слизистой и серозной биологической ткани при эндоскопических исследованиях. Скоростной режим необходим для повышения диагностической эффективности метода оптической когерентной томографии в клинической практике.

Публикации

1. Zagaynova E., Gladkova N., Shakhova N., Gelikonov G., Gelikonov V. Endoscopic OCT with forward-looking probe: clinical studies in urology and gastroenterology // J. Biophoton. V.1, №2, 2008, P. 114-128.
2. Геликонов В.М., Геликонов Г.В. Волоконно-оптические реализации метода кросс-поляризационной оптической когерентной томографии для эндоскопических исследований // Квантовая электроника. - 2008. - Т. 38, № 7. - С.634-640.
3. Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Шилягин П.А. Линейный по оптической частоте спектрометр для реализации скоростного режима в спектральной оптической когерентной томографии // Оптика и спектроскопия. - 2009. - Т. 106, № 3. - С.518-525.
4. Shabanov D.V., Geliknov G.V., Gelikonov V.M. Broadband digital holographic technique of optical coherence tomography for 3-dimensional biotissue visualization // Laser Physics Letters. - 2009. - V. 6, N. 10. - P. 753-758.

**II. РЕЗУЛЬТАТЫ,
ПРЕДСТАВЛЯЕМЫЕ
В ОТЧЕТ РАН ПО РАЗДЕЛУ
«ОСНОВНЫЕ ИСЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ
НАУЧНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ РАН,
ГОТОВЫЕ К ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ»**

Плазменный реактор для высокоскоростного осаждения алмазных пленок из газовой фазы

Разработан плазменный реактор для выращивания поликристаллических алмазных пленок в плазме, создаваемой излучением непрерывного гиротрона на частоте 28 ГГц. Реактор позволяет выращивать алмазные пленки и пластины большой площади (более 100 см²) со скоростью роста не менее 10 мкм/час. За счет получения плазмы высокой плотности с помощью волновых пучков в созданном реакторе скорость роста алмазных пленок высокого качества значительно превосходит скорость роста в существующих СВЧ реакторах, в которых плазма поддерживается излучением на частотах 915 МГц и 2,45 ГГц.

Полученные результаты (реактор, а также синтезируемые на нём материалы - алмазные пленки и пластины) будут использованы в следующих отраслях: электроника, ядерная техника, лазерная техника, оптика синхротронного излучения, электрохимия, обрабатывающая промышленность, а также для создания радиационно-стойких детекторов ионизирующего излучения, окон для гиротронов мегаваттной мощности и мощных технологических СО₂ лазеров.

На данный результат "Плазменный реактор для высокоскоростного осаждения алмазных пленок из газовой фазы" подана заявка на выдачу патента на изобретение РФ.

Серия фотометрических видеокамер для оптической астрономии

Разработана серия высокостабильных охлаждаемых без жидких криоагентов фотометрических видеокамер для оптической астрономии с применением различных современных приемников изображения видимого диапазона.

Разработанные камеры построены по принципу максимальной унификации механических и электронных узлов в сочетании с высоким качеством регистрации слабых изображений. Они обеспечивают возможность их эффективной инновационной реализации в серийном производстве, как для задач оптической астрономии, так и других областей науки и техники. Разработанный набор камер представляет собой универсальный типоряд изделий новейшего класса, впервые созданный в РФ.

В серию входят:

- камера для составных (мозаичных) приемников с большими размерами фоточувствительной поверхности с охлаждением рефрижераторной системой замкнутого цикла дроссельного типа;
- камера для средне- и малоформатных монолитных ПЗС-матриц также с применением рефрижератора замкнутого цикла;
- камера для крупно- и малоформатных ПЗС-матриц с термоэлектрическим охлаждением.

Модуляторы-калибраторы для радиометров миллиметрового диапазона

Разработаны и созданы малогабаритные полупроводниковые приборы миллиметрового диапазона длин волн (8 – 2,5 мм) на базе диодов Шоттки, одновременно выполняющие функции и модуляторов, и генераторов шума, электрически перестраиваемых в широком интервале эффективных температур (155-600 К). Физической основой этих приборов является зависимость сопротивления и эффективной температуры излучения диодов Шоттки от тока смещения. Применение таких приборов в качестве модуляторов-калибраторов в радиометрах миллиметрового диапазона позволяет проводить как измерения собственного излучения атмосферы и подстилающей поверхности, так и тепловую калибровку радиометров без использования находящихся при разных температурах согласованных нагрузок (в частности, охлаждаемых кипящим азотом) и устройств для их подключения. Это открывает новые возможности для создания

малогабаритных высокочувствительных микроволновых комплексов для исследования окружающей среды.

Диагностический комплекс для экспресс анализа жизнеспособности трансплантантов

На основе разработанных контактных резонансных датчиков СВЧ диапазона создан диагностический комплекс для экспресс-анализа жизнеспособности органов, подготовленных к трансплантации. Разработаны методики, позволяющие оценивать жизнеспособность трансплантата, а также характеристик консервирующей жидкости (кустодиола), меняющихся в результате распада клеток находящегося в ней органа, подготовленного к трансплантации. Использование данного комплекса позволит выполнять анализ жизнеспособности трансплантатов в реальном времени.

Элементы суммирования и коммутации квазиоптических потоков диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн

Элементы суммирования и коммутации квазиоптических потоков диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн перспективны для управления мощным СВЧ излучением нагрева и стабилизации плазмы в действующих установках управляемого термоядерного синтеза (УТС): ASDEX-Upgrade, FTU. В случае успешной демонстрации на современных токамаках, эти элементы будут предложены для использования в международном УТС реакторе ITER. Некоторые из новых электродинамических элементов могут представить интерес для мощной радиолокации высокого разрешения.

Визуализатор микроволнового излучения газоразрядный (ВМИГ)

Разрабатывается газоразрядный визуализатор СВЧ излучения, который использует для визуализации и определения пространственной структуры миллиметровых волн оптический континуум, излучаемый слоем плазмы положительного столба Cs-Xe разряда. Такой газоразрядный визуализатор предназначен для количественных измерений в реальном масштабе времени пространственного распределения интенсивности СВЧ излучения невысокой и средней мощности в широком диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн. Принцип его действия основан на эффекте увеличения яркости в видимом диапазоне e-Xe тормозного континуума при нагреве электронов под действием падающего на плазму СВЧ излучения. Данный метод визуализации обладает рекордным для визуализаторов на основе непрерывных сред временным разрешением, равным примерно 1 мкс, и рекордной величиной чувствительности по энергии. Были проведены успешные демонстрационные эксперименты по определению пространственного распределения интенсивности миллиметрового излучения восьми, трех и двух миллиметрового диапазонов на выходе рупорных антенн различного типа, а также в квазиоптических пучках. Данный метод был также применен для определения зависимости мощности СВЧ излучения от частоты.

Метод может быть использован для радиовидения и неразрушающего контроля в реальном времени. Были проведены эксперименты, в которых при помощи данного метода теневые радиоизображения объектов, освещаемых импульсным СВЧ излучением с длиной волны 8,5 мм, преобразовывались в видимые изображения. Изображения ряда амплитудных и фазовых объектов с характерными размерами несколько сантиметров были получены с частотой следования кадров 12,5 Гц. Было экспериментально показано, что данный метод радиовидения может применяться для регистрации динамических процессов, а также для оперативного обнаружения скрытых предметов, в частности, таблеток, порошков и ювелирных украшений, помещенных в почтовые конверты и бандероли.

Привод наноперемещений

Разработано устройство, перемещающее инструмент, манипулятор и т.д. на расстоянии до метра, с точностью позиционирования 1 нм. В основу конструкции исполнительного устройства перемещений легла идея использования упругих деформаций перемещающего механизма и пьезокерамики в качестве силовых элементов, эту деформацию осуществляющих. Две пары рычажных, пружинных зажима (на основе пьезокерамики) по краям и упруго деформируемые металлические трубки между ними обеспечивают шаг механизма вдоль одной координаты от одного нанометра до нескольких микрон. Принцип перемещения аналогичен перемещению гусеницы по ветке дерева. Устройство обеспечивает силовой зажим перемещающего механизма и соответственно силовую подачу инструмента. Осуществление указанной точности обеспечивается непрерывным точным контролем дистанции с применением стабилизированных по частоте источников излучения (квантовый эталон длины) с использованием интерференционных схем, и непрерывной обратной связью с исполнительным механизмом. Оригинальность разработки подтверждается поданными заявками, прошедшими патентную экспертизу и выданными патентами. Отличительными особенностями разработки является высокая точность на больших расстояниях, быстроедействие, а также значительное силовое воздействие на обрабатываемый инструмент, что позволяет использовать привод перемещений в прецизионных станках механической обработки. Учитывая компьютерное управление процессом, разработанное устройство, при наличии соответствующего программного обеспечения, позволит заменить высококвалифицированных специалистов рабочих специальностей. Привод найдет применение при производстве микро и нанoeлектронных устройств, точных механических приборов и т. п. Особый интерес представляет использование привода в ультрапрецизионных системах позиционирования нанотехнологических установок. Обладая высокими техническими характеристиками, разработанное устройство является дешевым в изготовлении и конкурентоспособным в ряду аналогичных устройств.

В настоящее время изготовлен и опробован действующий одномерный макет, опробована система контроля дистанции. Ведутся работы по совмещению оптической системы измерения координат и механизма привода.

Метод понижения импеданса электронных пучков в сильноточных релятивистских ЛОВ.

Метод основан на применении замедляющих систем с прямоугольной формой гофрировки, что позволяет значительно уменьшить неблагоприятное воздействие полей высокочастотного и квазистатического пространственных зарядов электронного пучка.

Использование прямоугольной формы гофрировки позволяет более чем в 2 раза уменьшить средний зазор между пучком и замедляющей системой, соответственно, уменьшается квазистатическое провисание потенциала пучка, а также и колебания высокочастотного потенциала. Это позволяет повысить рабочий ток генератора и, соответственно, выходную мощность без увеличения рабочего напряжения. На основе данного метода разработана релятивистская ЛОВ с импедансом электронного пучка $\rho \approx 60 \text{ Ом}$ и КПД порядка 25%. Данная ЛОВ готова к практическому использованию.

Методы повышения энергетического КПД релятивистской ЛОВ с сильноточным взрывоэмиссионным электронным пучком, работающей с высокой тактовой частотой.

Разработан ряд методов повышения энергетического КПД релятивистской ЛОВ с сильноточным взрывоэмиссионным электронным пучком, работающей с высокой тактовой частотой:

- подбором конфигурации катодного экрана и структуры силовых линий фокусирующего магнитного поля с углом входа менее 10° удалось уменьшить ток обратного электронного пучка до 0,05-0,1 от тока прямого (рабочего) пучка;
- путем повышения групповой скорости рабочей электромагнитной волны удалось уменьшить время включения релятивистской ЛОВ до 30 периодов высокочастотного излучения; в экспериментальном макете 3-х сантиметровой ЛОВ время включения не превышало 3-х нс.

На их основе разработан экспериментальный макет 3-х сантиметровой ЛОВ с параметрами: выходной мощностью превышающей 1,2 ГВт, длительностью импульса (τ) более 25 нс и временем переходного процесса менее 4-х нс, КПД по мощности более 35% и по энергии до 28%, сопротивлением рабочего пучка менее 60 ом, шириной спектра выходного излучения не более $\frac{\Delta f}{f} < \frac{2}{\tau}$. Генератор спроектирован для работы с высокой тактовой частотой (более 500 Гц) и готов к практическому использованию.

Комплекс высоковольтных источников питания гиротронной установки для напыления алмазных пленок

Комплекс обеспечивает генерацию гиротроном СВЧ-излучения мощностью до 15кВт в непрерывном режиме. В состав комплекса входят источник ускоряющего напряжения ВИЭП 25/2.4, источник накала гиротрона ИН10/35 и источник питания электроразрядного насоса. Величина ускоряющего напряжения регулируется в диапазоне 5÷25кВ при максимальном токе нагрузки 2,4А. Коэффициент пульсаций ускоряющего напряжения в рабочем диапазоне 20÷25кВ не превышает 0,2%. Комплекс управляется от персонального компьютера.

Научно-практическая значимость работы: отработаны конструкция и технология изготовления автоматизированных комплексов высоковольтных стабилизированных источников электропитания мощных гиротронов, что позволяет создавать на основе единых технических решений системы электропитания различных типов мощных СВЧ-приборов.

В настоящее время изготовлены и приняты в эксплуатацию два комплекса. Аналогичный третий комплекс изготовлен по заказу ЗАО НПП «Гиком» в 2009 г.

Высоковольтный источник питания магнетронной установки для напыления алмазных пленок

Источник обеспечивает генерацию магнетроном типа М-168 СВЧ излучения средней мощностью до 5кВт как в непрерывном режиме, так и в импульсно-периодическом с частотой от 10 до 500 Гц при скважности импульсов 2. Величина выходного тока источника (тока магнетрона) регулируется в диапазоне 0,5÷3,2 А при максимальном напряжении на магнетроне 5,5 кВ. Коэффициент пульсаций тока магнетрона не превышает 1 %. С целью уменьшения массы и габаритов источника, а также упрощения его эксплуатации, проведены исследования тепловых режимов различных конструкций источника питания. В результате проведенных исследований были найдены технические решения, благодаря которым удалось снизить до заданных

значений размеры и вес источника питания. Источник управляется от персонального компьютера.

Научно-практическая значимость работы: Разработан мощный высоковольтный источник питания технологической магнетронной установки, отличающийся высокими массо-габаритными характеристиками и широкими функциональными возможностями.

В настоящее время изготовлены два высоковольтных источника питания.

Система электропитания гиротронного комплекса по исследованию ионных пучков

Система электропитания (СЭ) обеспечивает генерацию гиротроном периодических импульсов СВЧ-излучения мощностью до 400 кВт длительностью до 1 мс с частотой 1 Гц. В состав СЭ входят генератор импульсов ускоряющего напряжения (ГИУН) и генератор импульсов магнитного поля (ГИМП), каждый из которых выполнен в отдельной приборной стойке размерами 600×600×1800 мм каждая.

ГИУН имеет следующие параметры:

- Амплитуда и длительность импульса выходного напряжения с неравномерностью вершины менее 1 % - 60 кВ, 1 мс.
- Амплитуда тока нагрузки – порядка 20 А.
- Частота следования выходных импульсов – до 1 Гц.

ГИМП имеет следующие параметры:

- Амплитуда и длительность по основанию импульса тока в соленоиде гиротрона – 1,5кА, 13 мс.
- Максимальное рабочее напряжение – 4,5 кВ.
- Частота следования выходных импульсов – до 1 Гц.

Научно-практическая значимость работы: впервые в практике ИПФ РАН для формирования высоковольтных импульсов напряжения прямоугольной формы использован транзисторный коммутатор, разработанный в отделе 196. Коммутатор позволяет формировать импульсы напряжения прямоугольной формы амплитудой до 10 кВ и длительностью от 100 мкс до десятков мс. Допустимая амплитуда импульсов тока через коммутатор составляет 500 А.

Стабилизированный высоковольтный источник питания гиротрона ВИП 90/0,07.

Источник обеспечивает питание гиротронов стабилизированным напряжением до 90кВ и током до 70мА. Источник может работать как в непрерывном, так и в импульсном режимах. Полярность выходного напряжения произвольная. Стабильность величины выходного напряжения не хуже 1%.

Научно-практическая значимость работы: отработаны конструкция и технология изготовления мощного высоковольтного импульсного трансформатора с высоковольтной изоляцией до 100кВ. Отработана схема дифференциального выделения сигнала обратной связи стабилизированного источника питания, что позволило сделать полярность его выхода произвольной, что имеет большое значение для многих приложений.

Модельный ряд эндоскопических оптических когерентных томографов для клинических приложений

В рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» разработана серия диагностических приборов со сменными торцевыми эндоскопическими зондами для клинической реализации метода оптической когерентной томографии – получения изображений приповерхностной структуры слизистых и серозных тканей внутренних

органов человека. Модельный ряд включает приборы, позволяющие проводить поляризационно-чувствительные измерения, повышающие диагностическую ценность метода, приборы с тонкими зондами, совместимыми с широким классом медицинской эндоскопической аппаратуры, а также скоростной вариант эндоскопического томографа с отображением 8 кадров в секунду, который позволяет наблюдать в реальном времени внутреннее состояние и подвижность исследуемой живой биологической ткани.

Авторы: Г. В. Геликонов, С. Ю. Ксенофонов, С. В. Лесниченко, М. В. Никулина, В. Н. Ромашов, В. М. Геликонов

Четырехканальный синхронизатор с микропроцессорным управлением

Четырехканальный синхронизатор с микропроцессорным управлением представляет собой автономный прибор, в котором в отличие от существующих аналогов введено

- сканирование по времени любых каналов с произвольным шагом;
- счетное число запусков;
- возможность полноценного управления по линии RS232;
- цифровая временная сетка с шагом 100 нс и максимальной задержкой до 0.8 сек.

Такой синхронизатор полезен в научных исследованиях при снятии временных зависимостей поведения объекта с автономными регистраторами типа "Тектроникс". Благодаря наличию встроенного микропроцессора возможно создание синхронизатора с любыми функциями.

Регистратор для калориметрии одиночных ВЧ импульсов с энергией от 0.1 Дж

Регистратор для калориметрии одиночных ВЧ импульсов с энергией от 0.1 Дж работает в автономном режиме или на линии с персональным компьютером. Прибор позволяет в автономном режиме запомнить временные реализации до четырех часов с последующим считыванием в компьютер. Благодаря наличию встроенного микропроцессора возможно создание любого регистратора нановольтовых сигналов.

Информационно-измерительная система по определению характеристик винтовых электронных пучков

Информационно-измерительная система по определению характеристик винтовых электронных пучков в генераторах электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн. Система позволяет измерять скоростной разброс, закрутку и коэффициент токопрохождения в зависимости от тока эмиссии, а также функцию распределения электронов по поперечным и продольным скоростям в моделирующем режиме.

Система автоматизации для резонаторного спектрометра миллиметрового диапазона

Система автоматизации сбора и обработки экспериментальных данных, а также для управления источником излучения в автоматизированном резонаторном спектрометре миллиметрового диапазона, предназначенного для исследования малого поглощения в газах.