

I. ВАЖНЕЙШИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 2023 ГОДА

1. Повышение мощности и стабильности генерации мегаваттного гиротрона для УТС в режиме захвата частоты внешним сигналом малой мощности

Г.Г. Денисов, А.Н. Куфтин, А.В. Чирков, М.Ю. Шмелев, В.И. Белоусов, А.А. Ананичев, А.П. Фокин, Ю.В. Новожилова, Г.Ю. Голубятников, Б.З. Мовшевич, И.В. Зотова, М.Ю. Глявин (ИПФ РАН)

Впервые экспериментально получен режим захвата частоты 170-ГГц мегаваттного гиротрона, разработанного для системы электронно-циклотронного нагрева токамака ИТЭР, сигналом малой (~20 кВт) мощности от стабилизированного гиротрона-драйвера. Внешний сигнал подавался в резонатор захватываемого гиротрона через комбинированную линию транспортировки излучения и двунаправленный квазиоптический преобразователь, позволяющий трансформировать входное излучение в рабочую моду. Продемонстрировано улучшение выходных характеристик излучения, включая существенное (~2,5), расширение полосы устойчивой одномодовой генерации рабочего типа колебаний, увеличение генерируемой мощности на 10%, а также возможность обуздания спектра, ширина которого в режиме захвата определяется спектром драйвера. Полученные результаты открывают возможность создания сверхмощных комплексов, состоящих из большого числа сфазированных мегаваттных гиротронов.

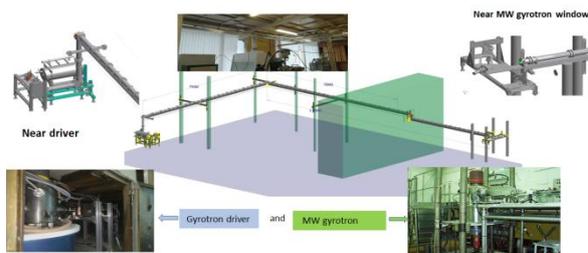


Рис. 1 Общий вид экспериментальной установки

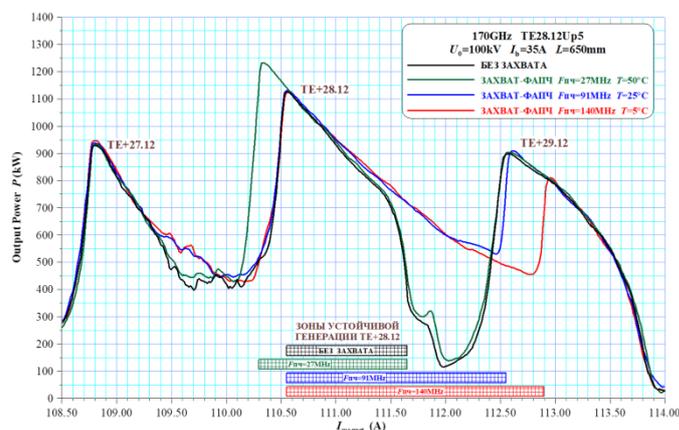


Рис. 2 Эволюция зоны генерации МВт гиротрона

Публикации:

1. A.N. Kuftin, G.G. Denisov, A.V. Chirkov, M.Yu. Shmelev, V.I. Belousov, A.A. Ananichev, B.Z. Movshevich, I.V. Zotova, M.Yu. Glyavin. First Demonstration of Frequency-Locked Operation of a 170 GHz/ 1 MW Gyrotron. *Electron Device Letters*, 44, 9, 1563-1566 (2023) DOI:10.1109/LED.2023.3294755
2. M.Y. Glyavin, G.G. Denisov, E.M. Tai, A.G. Litvak. Russian gyrotrons: overview and challenge. *24-th International Vacuum Electronics Conference*. April 26-28, 2023, Chengdu, China. DOI: 10.1109/IVEC56627.2023.10157774

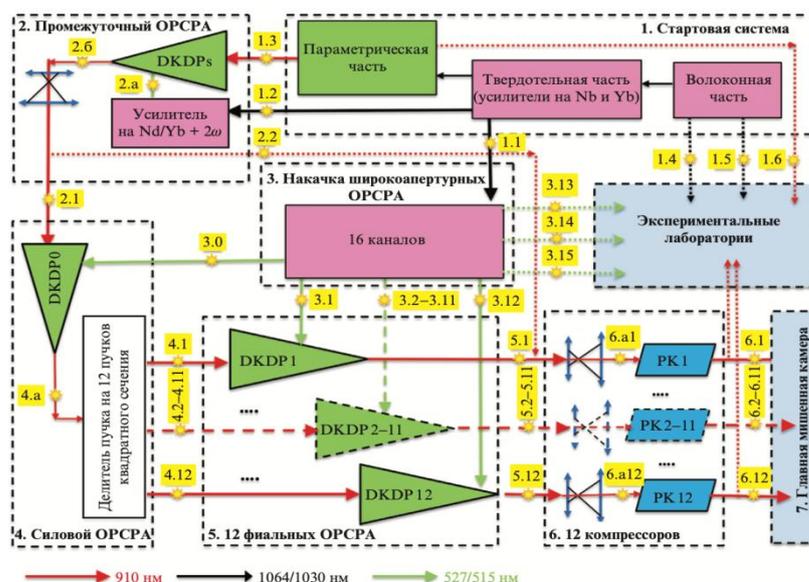
Темы: Работа выполнена: в рамках КП РГТН тема госзадания FFUF-2022-0007 и проекта РНФ №19-79-30071.

Направление ПФНИ: 1.3.2.11 Фундаментальные проблемы физической электроники.

2. XCELS – Международный центр исследований экстремальных световых полей

Е.А. Хазанов, А.А. Шайкин, И.Ю. Костюков, В.Н. Гинзбург, И.Б. Мухин, И.В. Яковлев, А.А. Соловьев, И.И. Кузнецов, С.Ю. Миронов, А.В. Коржиманов, Д.Н. Буланов, И.А. Шайкин, А.А. Кочетков, А.А. Кузьмин, М.А. Мартьянов, В.В. Ложкарев, М.В. Стародубцев, А.Г. Литвак, А.М. Сергеев (ИПФ РАН)

На основе теоретических исследований и проведенных на лазере PEARL экспериментов детально разработан проект XCELS, целью которого является создание уникального источника света с мощностью 600 ПВт на основе оптического параметрического усиления чирпированных импульсов в кристалле DKDP. Один канал лазерной системы XCELS потенциально способен обеспечить уровень интенсивности в фокусе в несколько раз больше, чем 10^{24} Вт/см². Пост-компрессия импульса позволит преодолеть уровень 10^{25} Вт/см². Дипольная фокусировка излучения 12 каналов даже без пост-компрессии и без фазировки приблизит интенсивность к 10^{26} Вт/см². В случае фазировки каналов интенсивность будет еще в несколько раз выше. Уникальные возможности XCELS в области экспериментальной физики сверхсильных электромагнитных полей связаны не только с этими рекордными значениями интенсивности, но и с мультипучковой архитектурой, позволяющей проводить эксперименты со сложными распределениями лазерных полей и с дополнительными каналами лазерного и вторичного излучений.



Публикации:

1. E. Khazanov, A. Shaykin, I. Kostyukov, V. Ginzburg, I. Mukhin, I. Yakovlev, A. Soloviev, I. Kuznetsov, S. Mironov, A. Korzhimanov, D. Bulanov, I. Shaikin, A. Kochetkov, A. Kuzmin, M. Martyanov, V. Lozhkarev, M. Starodubtsev, A. Litvak, and A. Sergeev, "Exawatt Center for Extreme Light Studies (XCELS)," High Power Laser Science and Engineering, vol. 11, pp.e78, 10.1017/hpl.2023.69, 2023.
2. Е.А. Хазанов, А.А. Шайкин, И.Ю. Костюков, В.Н. Гинзбург, И.Б. Мухин, И.В. Яковлев, А.А. Соловьев, И.И. Кузнецов, С.Ю. Миронов, А.В. Коржиманов, Д.Н. Буланов, И.А. Шайкин, А.А. Кочетков, А.А. Кузьмин, М.А. Мартьянов, В.В. Ложкарев, М.В. Стародубцев, А. Г. Литвак, and А. М. Сергеев, "XCELS – Международный центр исследований экстремальных световых полей," Квантовая электроника, vol. 53, p.95, 2023.
3. I.Y. Kostyukov, E.A. Khazanov, A.A. Shaikin, A.G. Litvak, and A. G. Sergeev, "International Exawatt Center for Extreme Light Studies (XCELS): Laser System and Experiment Program," Bulletin of the Lebedev Physics Institute, vol. 50, pp. S635–S640, 2023.

4. V. Ginzburg, M. Martyanov, D. Silin, A. Kochetkov, I. Yakovlev, A. Kuzmin, S. Mironov, I. Shaikin, S. Stukachev, A. Shaykin, and E. Khazanov, "Small-scale fluctuations of laser beam fluence at the large B-integral in ultra-high intensity lasers," *Opt Express*, vol. 31, pp. 4667-4674, 2023.
5. I. B. Mukhin, K. A. Glushkov, A. A. Soloviev, A. A. Shaikin, V. N. Ginzburg, A. A. Kuzmin, M. A. Martyanov, S. E. Stukachev, S. Y. Mironov, I. V. Yakovlev, and E. A. Khazanov, "Upgrading the frontend of the PW-class PEARL laser facility," *Applied Optics*, vol. 62, pp. 2554-2559, 2023.
6. A. Kochetkov, M. Martyanov, V. Ginzburg, and E. Khazanov, "Self-filtering of beam fluence fluctuations at free space propagation," *Laser Physics Letters*, vol. 20 p. 065001, 2023.
7. M. Martyanov and E. Khazanov, "Pulse fluence noise dynamics at free space propagation," *JOSA A*, pp. 1507-1514, 2023.
8. С. Ю. Миронов and Е. А. Хазанов, "Пост-компрессия импульса второй гармоники – путь увеличения пиковой мощности и временного контраста сверхмощных лазерных импульсов," *УФН*, vol. 193, принята в печать 2023.
9. M. Martyanov, V. Ginzburg, A. Balakin, S. Skobelev, D. Silin, A. Kochetkov, I. Yakovlev, A. Kuzmin, S. Mironov, I. Shaikin, S. Stukachev, A. Shaykin, E. Khazanov, and A. Litvak, "Suppressing small-scale self-focusing of high-power femtosecond pulses," *High Power Laser Science and Engineering*, vol. 11, p. e28, 2023.
10. A. Kochetkov, E. Kocharovskaya, and E. Khazanov, "Impact of random spatial noise of a laser beam on the probability of fluence to exceed the threshold value," *JOSA B*, vol. 40, pp. 2851-2859, 2023.

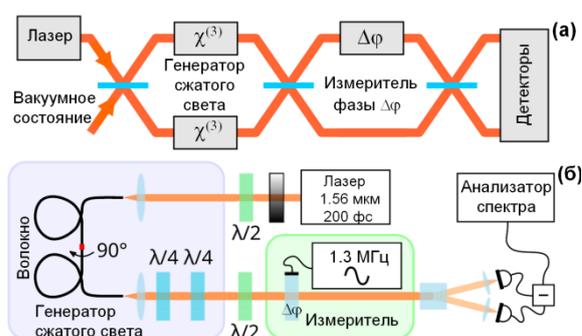
Тема: Государственное задание ИПФ РАН, проект № 0030-2021-0015.

ПФНИ: 1.3.5.1. Взаимодействие лазерного излучения с веществом, в том числе в сверхсильных полях; создание лазеров сверхкоротких сверхмощных импульсов излучения

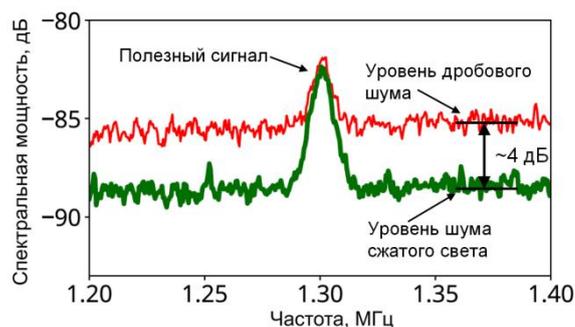
3. Квантовая интерферометрия с керровским сжатием

Андрианов А.В., Анашкина Е.А., Сорокин А.А. (ИПФ РАН); Калинин Н.А., Лойхс Г., Дирмайер Т., Санчес-Сото Л. (Max Planck Institute for the Science of Light, Германия); Корни Дж. (University of Queensland, Австралия)

Впервые с помощью сжатых когерентных состояний, полученных в керровской среде, экспериментально продемонстрирована возможность повышения чувствительности интерферометрических измерений на 4 дБ лучше стандартного квантового предела, тогда как в предшествующих демонстрациях для повышения чувствительности использовались сжатые вакуумные состояния, генерированные в средах с квадратичной нелинейностью. Для этого разработана оригинальная система на основе нелинейных поляризационно-поддерживающих волокон для сжатия квантовой неопределенности состояния поляризации фемтосекундных импульсов лучше -5 дБ, обладающая высокой долговременной стабильностью без активных систем стабилизации. Разработаны численные модели и аналитические приближения для описания процесса генерации сжатых состояний в нелинейных волокнах с учетом эффектов дисперсии, потерь, керровской и рамановской нелинейностей, показавшие хорошее согласие с экспериментальными результатами, и позволяющие оптимизировать параметры волокон и импульсов для получения наилучшего сжатия.



(а) Общая схема интерферометра с квантовым керровским сжатием, состоящая из генератора сжатого света и измерительной части, (б) схема демонстрационного эксперимента на основе поляризационного интерферометра.



Повышение чувствительности интерферометра: полезный сигнал и уровень шума без квантового сжатия (красная кривая) и с квантовым сжатием (зеленая кривая).

Публикации:

1. N. Kalinin, T. Dirmeier, A. A. Sorokin, E. A. Anashkina, L. L. Sánchez-Soto, J. F. Corney, G. Leuchs, and A.V. Andrianov. Observation of Robust Polarization Squeezing via the Kerr Nonlinearity in an Optical Fiber// *Adv. Quantum. Tech.* **6**, 2200143 (2023)
2. N. Kalinin, T. Dirmeier, A. A. Sorokin, E. A. Anashkina, L. L. Sánchez-Soto, J. F. Corney, G. Leuchs, and A.V. Andrianov. Quantum-enhanced interferometer using Kerr squeezing// *Nanophotonics* **12**, 2945–2952 (2023)
3. A.V. Andrianov, N.A. Kalinin, A.A. Sorokin, E.A. Anashkina, L.L. Sánchez-Soto, J.F. Corney, and G. Leuchs, Optimizing the generation of polarization squeezed light in nonlinear optical fibers driven by femtosecond pulses// *Opt. Express* **31**, 765 (2023)

Финансирование: Министерство науки и высшего образования РФ в рамках проектов 075-15-2021-633 и 075-15-2022-316.

ПФНИ: 1.3.5.2. Перспективные методы оптических квантовых вычислений и квантовых коммуникаций

4. Квантовая память в кристалле Eu:YSO для поляризационных и временных кубитовых состояний

Ахмеджанов Р.А., Гушин Л.А., Зеленский И.В., Низов В.А., Низов Н.А.,
Собгайда Д.А. (ИПФ РАН), Калачев А.А. (ФИЦ КазНЦ)

Продemonстрировано хранение и считывание поляризационного состояния света памятью на основе атомной частотной гребенки в кристалле $^{153}\text{Eu}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ как для режима с яркими импульсами, так и в однофотонном режиме. Проведена реконструкция χ -матрицы процесса, соответствующего реализованной квантовой памяти, продемонстрирована точность воспроизведения квантового состояния на уровне 80% при максимальной эффективности около 26% и рабочей полосе порядка 10 МГц. Также показано, что память с высокой точностью сохраняет разность фаз между записываемыми импульсами, что принципиально для работы с временными кубитами. Полученные результаты являются важным этапом на пути реализации квантовых сетей связи на основе квантовых повторителей, обладающих значимыми приложениями, среди которых: аппаратно-независимая криптография, распределенные и слепые квантовые вычисления, квантовая синхронизация часов и т.д.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка системы квантового распределения ключа с квантовым повторителем на основе оптической памяти», финансируемого ОАО РЖД в соответствии с «дорожной картой» развития высокотехнологичной области «Квантовые коммуникации».

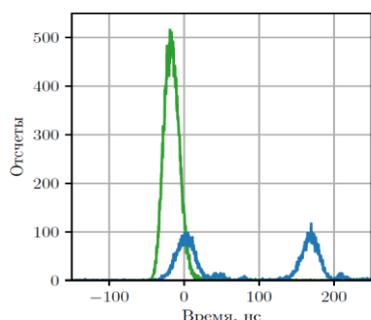


Рис. 1 Сигнал эха при числе фотонов в записываемом импульсе порядка 0,3 (синяя линия).

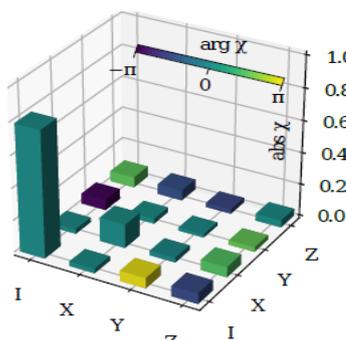


Рис. 2 χ -матрица реконструированного процесса квантовой памяти.

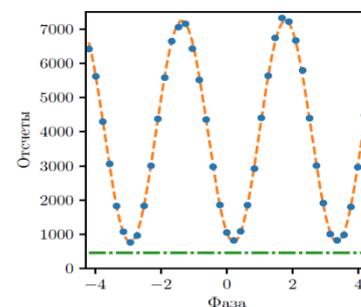


Рис. 3 Интерференция двух эхо-сигналов (число фотонов в записываемом импульсе порядка 0,3).

Публикации:

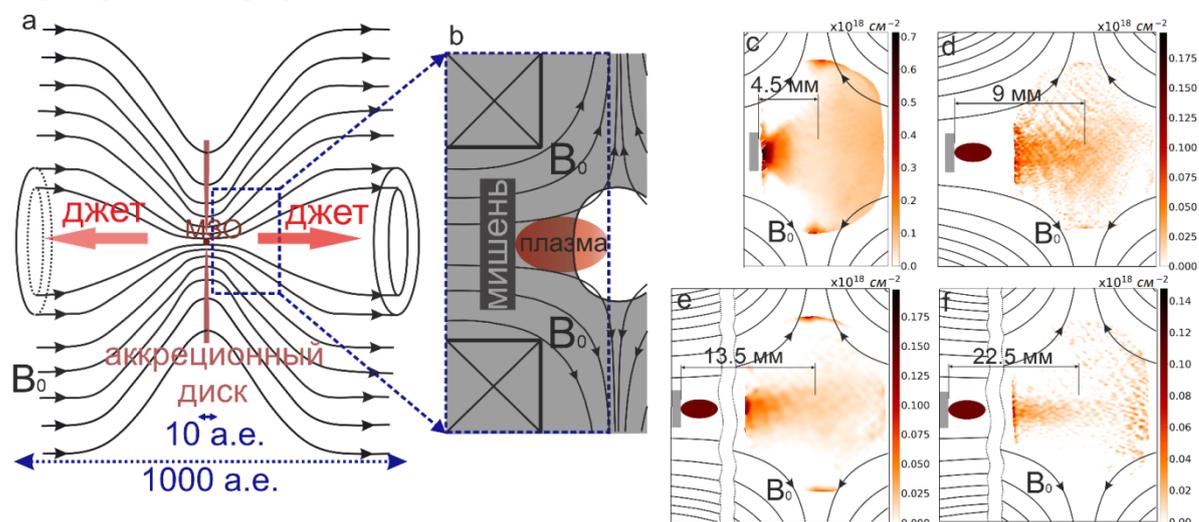
1. R. A. Akhmedzhanov, L. A. Gushchin, A. A. Kalachev, N. A. Nizov, V. A. Nizov, D. A. Sobgayda and I. V. Zelensky. Memory for polarization state of light based on atomic frequency comb in a $^{153}\text{Eu}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ crystal. [Laser Physics Letters](#), 2023, [Volume 20](#), [Number 1](#), 015204, DOI 10.1088/1612-202X/aca758
2. Р.А. Ахмеджанов, Л.А. Гушин, И.В. Зеленский, А.А. Калачев, В.А. Низов, Н.А. Низов, Д.А. Собгайда. Квантовая память в кристалле Eu:YSO для поляризационных и временных кубитовых состояний. Радиофизика. Принята к публикации.

ПФНИ: 1.3.5.2. Перспективные методы оптических квантовых вычислений и квантовых коммуникаций.

5. Лабораторное моделирование коллимации протозвездных джетов расходящимся полоидальным магнитным полем

Земсков Р.С., Бурдонов К.Ф., Соловьев А.А., Сладков А.А., Коржиманов А.В., Глявин М.Ю., Морозкин М.В., Проявин М.Д., Лучинин А.Г., Гинзбург В.Н., Кочетков А.А., Кузьмин А.А., Шайкин И.А., Перевалов С.Е., Котов А.В., Яковлев И.В., Шайкин А.А., Хазанов Е.А., Стародубцев М.В. (ИПФ РАН); Ciardi A. (Sorbonne Université, France); Fuchs J. (LULI – CNRS, France).

На лазерном комплексе PEARL проведены эксперименты по лабораторному моделированию процесса формирования и распространения джетов – узконаправленных сверхзвуковых струй вещества, характерных для аккрецирующих звездных объектов, в частности, протозвезд. Изучен механизм коллимации джетов в типичном для протозвезд неоднородном полоидальном магнитном поле со структурой «песочных часов». Магнитное поле требуемой конфигурации создавалось уникальной магнитной системой усиленной конструкции, выдерживающей механические нагрузки до 10^8 Н/м² и позволяющей при встречном включении тока в катушках генерировать магнитное поле индукцией 9 Тл. Численное моделирование уникальным гибридным PIC кодом продемонстрировало выполнение подобия Эйлера, подтверждающее масштабирование лабораторной и астрофизической систем.



(a) Схематическое изображение структуры полоидального магнитного поля около молодого звездного объекта (МЗО); (b) схема лабораторного моделирования; (c - f) измеренные профили концентрации плазменного джета с начальными условиями, отличающимися расходямостью магнитного поля.

Публикация:

1. R. Zemskov, K. Burdonov, A. Soloviev, A. Sladkov, A. Korzhimanov, J. Fuchs, D. Bisikalo, A. Zhilkin, M. Barkov, A. Ciardi, W. Yao, M. Glyavin, M. Morozkin, M. Proyavin, A. Luchinin, P. Chuvakin, V. Ginzburg, A. Kochetkov, A. Kuzmin, A. Shaykin, I. Shaikin, S. Perevalov, A. Kotov, S. Pikuz, S. Ryazantsev, E. Khazanov, M. Starodubtsev. Laboratory modelling of YSO jets collimation by a large-scale divergent interstellar magnetic field // *Astronomy & Astrophysics*, 2023 (принято к публикации) <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245251>

Финансирование: Грант Минобрнауки «Новые источники синхротронного излучения и нейтронов на принципах лазерного ускорения заряженных частиц», договор № 075-15-2021-1361 от 07.10.2021 г.; 10-й проект Национального центра физики и математики «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика».

ПФНИ: 1.3.4.3. Пламенные процессы в геофизике и астрофизике

6. Излучение упругих тел в турбулентном потоке жидкости

А.С. Суворов, И.А. Вьюшкина, О.Ф. Севрюков, Н.В. Балакирева, П.И. Коротин, Д.А. Сергеев, С.Г. Зайцева, А.В. Стуленков, К.А. Костылев, В.В. Артельный, (ИПФ РАН)

Решена проблема достоверного прогноза характеристик гидродинамического шума, возникающего при движении упругих тел в турбулентном потоке. Решение базируется на развитии гибридного подхода "гидродинамика-акустика" к численному моделированию за счет применения методов синтетической турбулентности и декомпозиции гидродинамической расчетной области. Технология расчёта обеспечивает снижение вычислительной сложности интегрирования уравнений Навье-Стокса и вычисления тензора напряжений Лайтхилла при корректном учёте резонансных форм колебаний тела. Достоверность алгоритмов, заложенных в созданное программное обеспечение «САТЕС», верифицирована при решении ряда задач излучения упругих тел в турбулентном потоке и валидирована на натуральных экспериментах. В результате применения технологии сформулированы требования по гидродинамической чистоте обтекаемых упругих тел и условиям возникновения акустических дефектов.

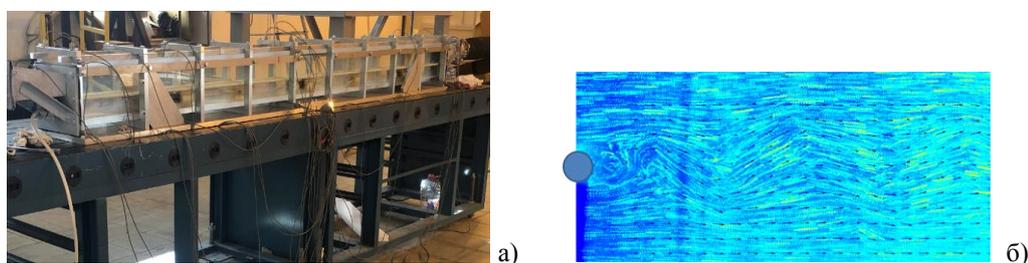


Рис.1 Вид одной из экспериментальных установок (а) и измеренное поле скоростей (б).

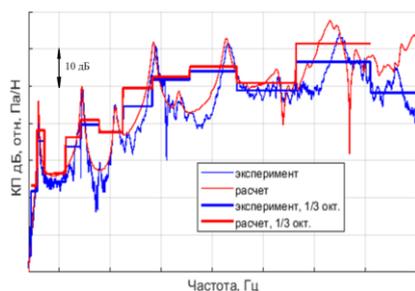


Рис.2. Результат верификации

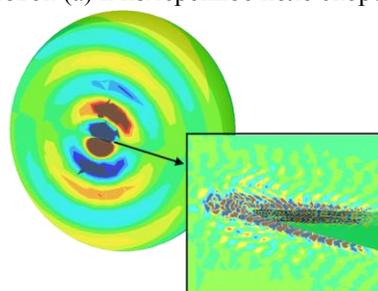


Рис.3 Результат расчёта излученного поля и псевдозвука

Публикации:

1. А.С. Суворов, Е.М. Соков, А.Л. Вировлянский, В.О. Еремеев, Н.В. Балакирева// Метод конечно-элементного моделирования гидродинамического шума, возникающего при обтекании упругих тел. Акустический журнал, 2023, том 69, №6, с.1-9.
2. Suvorov A., Sevriukov O., Sokov E., Salin M., Zaitseva S. and Sharagina V. (2023) Software for Acoustic Design.// Journal of Applied Mathematics and Physics, 11, 2515-2522. doi: 10.4236/jamp.2023.118162. (<https://doi.org/10.4236/jamp.2023.118162>)
3. А.С. Суворов, Е.М. Соков, Вьюшкина И.А., Севрюков О.Ф. и др.// ПО "САТЕС ДК 2.0", свидетельство о государственной регистрации №2022663702 от 19.07.2022.

Работа выполнена в рамках Постановления Правительства РФ №707 о суперкомпьютерных вычислениях и госзадания ИПФ РАН– тема FFUF-2022-0003.

Направление ПФНИ: 1.3.6.7. Радиофизические и акустические методы диагностики окружающей среды, связи и локации.

7. Высокотехнологичный преобразователь моды с большим продольным волновым числом в узконаправленное излучение с гауссовой структурой

Г.Г. Денисов, Д.И. Соболев, М.Д. Проявин, А.П. Гаштури, М.В. Морозкин, В.Е. Котомина, М.В. Каменский, А.А. Орловский (ИПФ РАН)

Предложен метод эффективного преобразования параксиальных волн металлического волновода большого сечения в гауссов волновой пучок. Синтезированная деформация поверхности волновода обеспечивает преобразование исходного параксиального пространственного спектра в спектр гауссова волнового пучка, распространяющегося под большим углом к оси волновода. Метод применен для преобразования моды $TE_{1,2}$ гиротрона с частотой 28 ГГц и мощностью 20 кВт в волноводе диаметром 66 мм. Эффективность преобразования составила 98,5%. Синтез поверхности волновода выполнен при использовании уникального итерационного алгоритма, разработанного в ИПФ РАН.

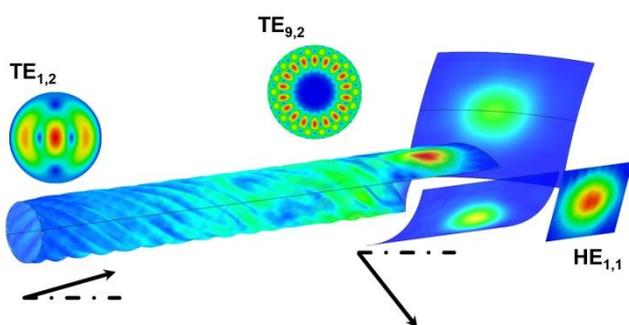


Рис. 1 Схема преобразователя

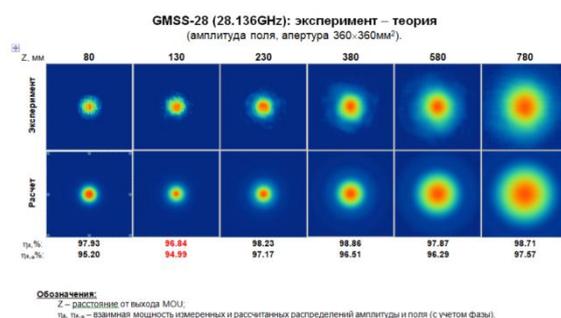


Рис. 2 Структура излучения на различном расстоянии от выходного окна в режиме непрерывной генерации мощностью 20 кВт

Публикации:

- 1 М.Проявин, М.Морозкин, В.Мануйлов, Е.Солуянова, Е.Тай, М.Каменский, А.Орловский, Д.Соболев, М.Глявин. Highly Efficient Technological Gyrotron System with Magnetically Shielded Solenoid. *24-th International Vacuum Electronics Conference*. April 26-28, 2023, Chengdu, China DOI: 10.1109/IVEC56627.2023.10157140
- 2 Проявин М.Д., Котомина В.Е. Способ изготовления СВЧ-компонентов сложной формы, имеющих развитую металлическую рабочую поверхность. Патент на изобретение 2795771 С1, 11.05.2023
- 3 А.П.Гаштури, Д.И.Соболев. Анализ сверхразмерных электродинамических систем комбинированным методом на основе принципа физической оптики и метода мультипольного разложения. *Изв. вузов Радиофизика*, 65б 5-6б 484-493 (2022)

Темы: Работа выполнена в рамках КП РГТН тема госзадания FFUF-2022-0007.

Направление ПФНИ: 1.3.6.2. Развитие методов генерации, усиления, преобразования и приема электромагнитных волн.

8. Моделирование эффектов взаимодействия сверхширокополосных электромагнитных импульсов с газами и плазмой с применением крупномасштабных передающих линий

М.Е. Гушин, А.В. Стриковский, А.В. Палицин, М.Б. Гойхман, А.В. Громов, И.Ю. Зудин, С.Ю. Корнишин, С.В. Коробков, А.В. Котов, А.В. Кузин, В.В. Корчагин, К.Н. Лоскутов, Ю.В. Родин, И.М. Вершинин, А.С. Николенко, Е.А. Мареев (ИПФ РАН), А.В. Кудрин, В.А. Еськин (ННГУ), В.А. Терехин (РФЯЦ-ВНИИЭФ).

Эффекты, возникающие при распространении сверхширокополосных электромагнитных импульсов (СШП ЭМИ) в атмосфере и ионосфере Земли в диапазоне частот 0,5–10 ГГц, впервые промоделированы с применением крупномасштабных передающих линий, которые заполняются частично ионизированной плазмой и возбуждаются генераторами нано- и субнаносекундных импульсов, в том числе – в магнитном поле, в экспериментах, проведенных на стенде «Крот». При уровнях напряженности электрического поля ЭМИ от 100 В/м до нескольких МВ/м в передающих линиях различного типа, включая сверхразмерную коаксиальную линию (длина 10 м, диаметр 1,4 м), симметричные полосковые линии и коаксиальную линию сверхвысокого напряжения, показаны эффекты линейной (дисперсионной) и нелинейной трансформации формы СШП ЭМИ в условиях нестационарной ионизации разреженного газа и нелинейного поглощения. Обнаружена филаментация свечения газа, возбуждаемого при распространении мощных ЭМИ, а также нестационарный – всплесковый – характер свечения в присутствии паров воды.

Публикации:

1. V.A. Es'kin, S.V. Korobkov, M.E. Gushchin, A.V. Kudrin. Propagation of an ultrawideband electromagnetic pulse along a plasma-filled coaxial line. IEEE Transactions on Plasma Science, V.51, No.2, p.374-380 (2023), DOI:10.1109/TPS.2022.3232559
2. С.В. Коробков, М.Е. Гушин, А.В. Стриковский, И.М. Вершинин, И.Ю. Зудин, К.Н. Лоскутов, А.С. Николенко, А.В. Палицин, А.В. Громов, М.Б. Гойхман, Е.А. Мареев. Нелинейные явления при распространении мощных наносекундных электромагнитных импульсов в крупномасштабных полосковых линиях в газе при пониженном давлении. Доклады российской академии наук. Физика, технические науки, Т. 510, с. 16–21 (2023), DOI: 10.31857/S2686740023030100

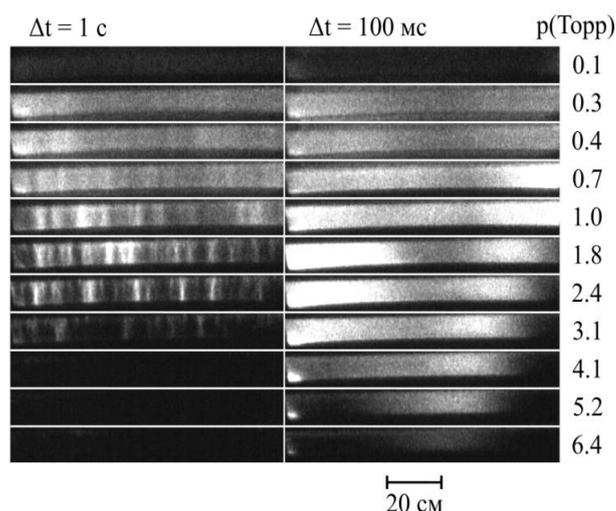


Рис.1. Фотография крупномасштабной коаксиальной линии (слева); фотографии свечения воздуха в передающей линии при прохождении мощных ЭМИ в зависимости от давления и периода повторения импульсов (справа).

Результат получен при поддержке Минобрнауки РФ (проект № 075-15-2020-790).

Направление ПФНИ 1.3.4.3. Пламенные процессы в геофизике и астрофизике.

9. Широкополосная оптическая диффузионная спектроскопия биотканей с самокалибрующимся контактным оптоволоконным щупом и ее применение в трансплантологии

Турчин И.В., Кириллин М.Ю., Костюк А.Б., Куракина Д.А., Орлова А.Г., Перекатова В.В., Хилов А.В., Сергеева Е.А. (ИПФ РАН) Бесчастнов В.В., Рябков М.Г. (ПИМУ)

Разработан прибор для широкополосной (450–1000 нм) оптической диффузионной спектроскопии с контактным оптоволоконным щупом и алгоритмом реконструкции, позволяющим определять кровенаполнение, оксигенацию, содержание воды и других хромофоров, а также характеристики рассеяния тканей. Реализованный в данном приборе подход самокалибровки позволил существенно уменьшить влияние поверхностных оптических неоднородностей тканей и исключить влияние переходных характеристик прибора на результат исследований. Совместно с сотрудниками Ожогового центра Приволжского исследовательского медицинского университета (ПИМУ) прибор был апробирован на экспериментальных животных для выявления различий в динамиках оксигенации, кровенаполнения и содержания воды в алло- и аутотрансплантатах кожи, используемых в качестве раневого покрытия. Полученные результаты могут быть использованы для ранней диагностики отторжения трансплантата.

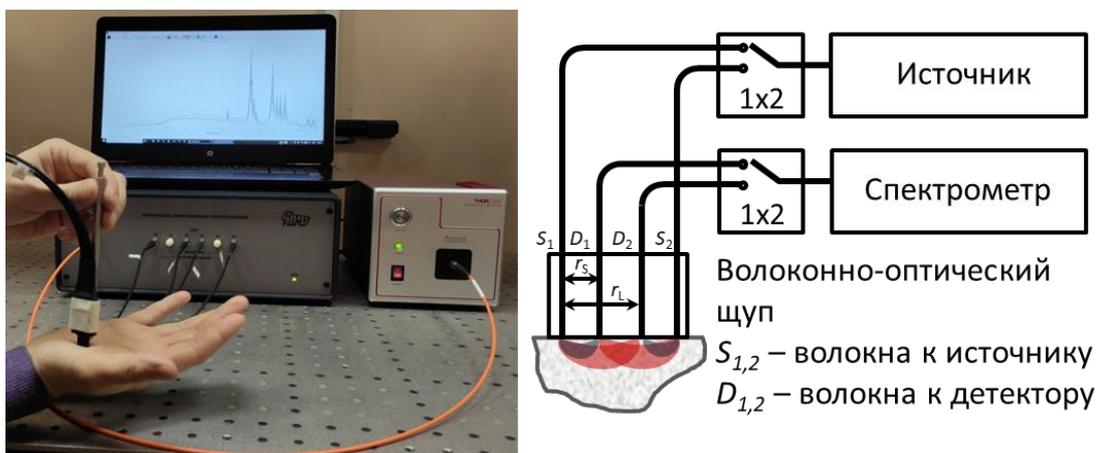


Схема (справа) и внешний вид прибора (слева) для оптической диффузионной спектроскопии с самокалибрующимся щупом.

Публикации:

1. Perekatova, V.; Kostyuk, A.; Kirillin, M.; Sergeeva, E.; Kurakina, D.; Shemagina, O.; Orlova, A.; Khilov, A.; Turchin, I. VIS-NIR Diffuse Reflectance Spectroscopy System with Self-Calibrating Fiber-Optic Probe: Study of Perturbation Resistance. *Diagnostics* 2023, 13, 457.
2. Turchin, I.; Beschastnov, V.; Peretyagin, P.; Perekatova, V.; Kostyuk, A.; Orlova, A.; Koloshein, N.; Khilov, A.; Sergeeva, E.; Kirillin, M.; Ryabkov, M. Multimodal Optical Monitoring of Auto- and Allografts of Skin on a Burn Wound. *Biomedicines* 2023, 11, 351.

Финансирование: в рамках реализации Программы НЦМУ “Центр фотоники” при финансовой поддержке Минобрнауки, соглашение № 075-15-2022-316.

ПФНИ: 1.3.5.7. Развитие методов фотоники для применения в технике и медицине

ИФМ РАН

1. Источник экстремального ультрафиолетового излучения диапазона 11,2 нм $\pm 1\%$ на основе лазерного разряда в потоке ксенона для литографии

И. С. Абрамов¹, С. В. Голубев¹, Е. Д. Господчиков¹, А. Г. Шалашов¹,
В. Е. Гусева², А. Н. Нечай², Н. Н. Салашченко², А. А. Перекалов², Н. И. Чхало²

¹) ИПФ РАН ²) ИФМ РАН – филиал ИПФ РАН

Развита концепция источника экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения на основе лазерного разряда с многозарядными ионами в потоке ксенона высокой плотности. Экспериментально продемонстрировано, что при фокусировке излучения Nd:YAG лазера с энергией 0,8 Дж и длительностью импульса 7 нс на сверхзвуковую струю ксенона можно получить ЭУФ излучение в диапазоне $11,16 \pm 0,13$ нм с энергией до 10 мДж, что отвечает эффективности конверсии 1%. Исследован новый механизм распространения разряда за пределы фокальной области, связанный с фотоионизацией окружающего газа ультрафиолетовым излучением и последующим нагревом образующейся плазмы потоком тепла из фокальной области за счет электронной теплопроводности. Предложенный механизм позволяет объяснить полученные в экспериментах данные и указать пути увеличения эффективности конверсии лазерного излучения в источниках ЭУФ излучения для проекционной литографии высокого разрешения.

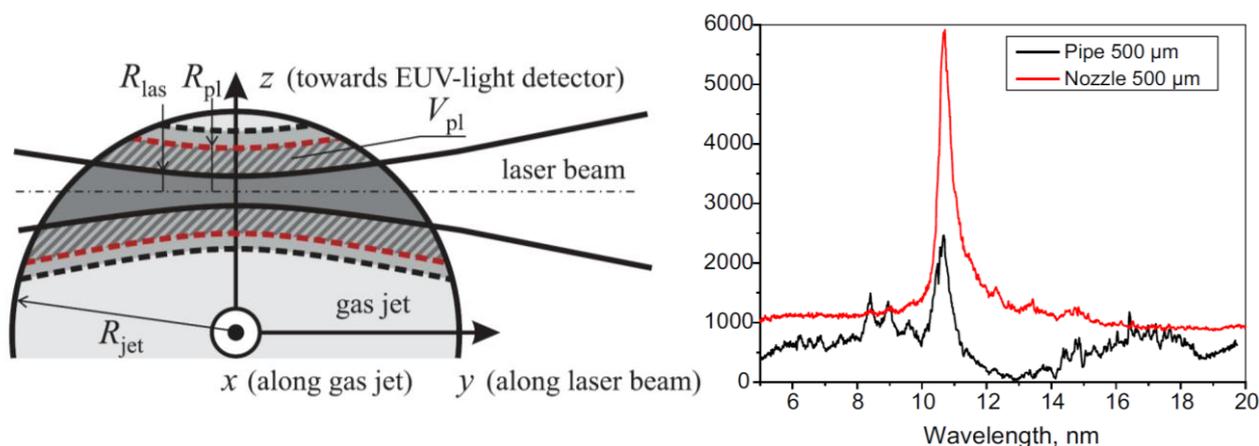


Схема эксперимента по генерации ЭУФ излучения лазерным разрядом в струе газа (слева) и измеренный спектр излучения многозарядных ионов ксенона (справа)

1. I.S. Abramov, S.V. Golubev, E.D. Gospodchikov, and A.G. Shalashov, Expansion of laser discharge in xenon jet improves EUV-light emission, *Appl. Phys. Lett.* 123, 193502 (2023).
2. V.E. Guseva, A.N. Nechay, A.A. Perekalov, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo, Investigation of emission spectra of plasma generated by laser pulses on Xe gas-jet targets, *Appl. Phys. B* 129, 155 (2023).

Финансирование: Научный центр мирового уровня “Центр фотоники”, номер соглашения 075-15-2022-316; РНФ проект №23-22-00270.

ПФНИ: 1.3.4. Физика плазмы; 2.6.2.5. Элементная база для перспективных информационно-вычислительных систем, работающих на новых физических принципах.

2. Система визуализации источников рентгеновского излучения на длине волны 11,25 нм.

А.А. Перекалов, М.В. Зорина, С.Ю. Зуев, А.Я. Лопатин, И.В. Малышев, М.С. Михайленко, А.Н. Нечай, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Д.Г. Реунов, Р.М. Смертин, М.Н. Торопов, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало (ИФМ РАН).

Создан визуализатор источников рентгеновского излучения на основе объектива Шварцшильда с многослойными Mo/Be зеркалами нормального падения, Mo/Be спектральными фильтрами и двухкоординатного детектора для характеристики лазерно-плазменного источника рентгеновского литографа. Созданная система на длине волны 11,25 нм, соответствующей лазерному пробое в сверхзвуковой струе криптона, характеризуется пятикратным увеличением, полем зрения в предметной плоскости 2,66 мм, разрешением до 4 мкм.

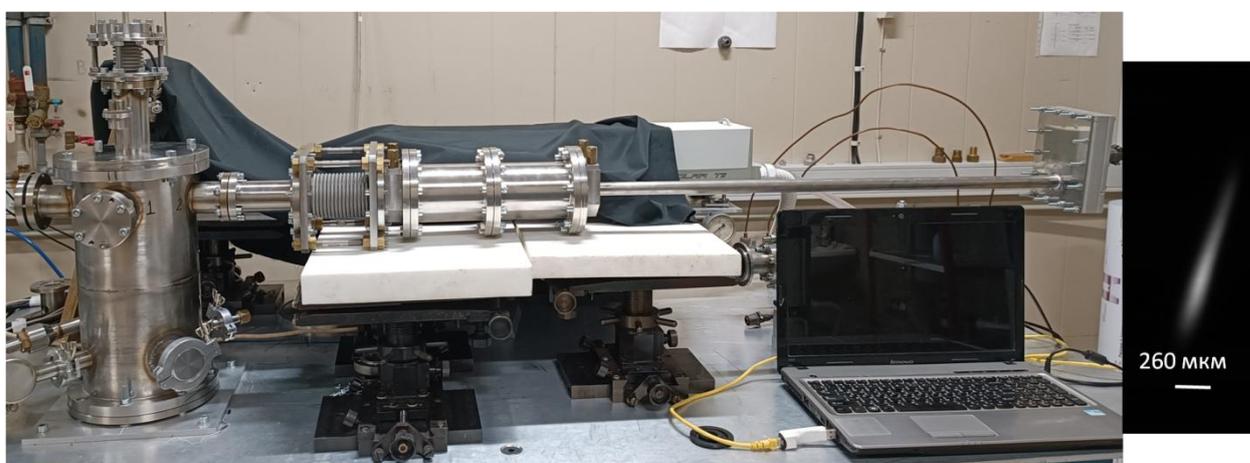


Рис.1. Система визуализации на экспериментальном стенде (слева) и изображение лазерной искры в газе (справа).

Публикация:

Е.С. Антюшин, А.А. Ахсахалян, С.Ю. Зуев, А.Я. Лопатин, И.В. Малышев и др. // Журнал технической физики. – 2022. – т.92. – вып.8. – с.1202-1206. (DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52784.80-22)

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФМ РАН FFUF-2021-0022.

ПФНИ: 1.3.5.4. Развитие методов спектроскопии, люминесценции и прецизионных оптических измерений.

3. Микроскоп для биологических исследований с возможностью аксиальной томографии на длине волны 13,8 нм.

И.В. Малышев (ilya-malyshev@ipmras.ru, +7 902 681 55 38), Д.Г. Реунов, И.Г. Забродин, М.В. Зорина, И.А. Каськов., А.Я. Лопатин, А.А. Нечай, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, М.С. Михайленко, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Р.М. Смертин, М.Н. Торопов, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало (ИФМ РАН).

Разработан светосильный микроскоп с рабочей длиной волны 13,8 нм на основе импульсного лазерно-плазменного источника рентгеновского излучения, проекционного объектива Шварцшильда на основе многослойных асферических рентгеновских зеркал с низкими аберрациями. Впервые в рентгеновской микроскопии реализована опция компьютерной аксиальной томографии, позволяющая восстанавливать объемное строение исследуемых образцов за счет перемещения их вдоль оптической оси. Основные характеристики микроскопа: увеличение 46 крат, поле зрения в предметной плоскости 290 x 290 мкм², латеральное разрешение 140 нм, аксиальное – 420 нм. Получены трехмерные рентгеновские изображения строений различных биологических объектов.

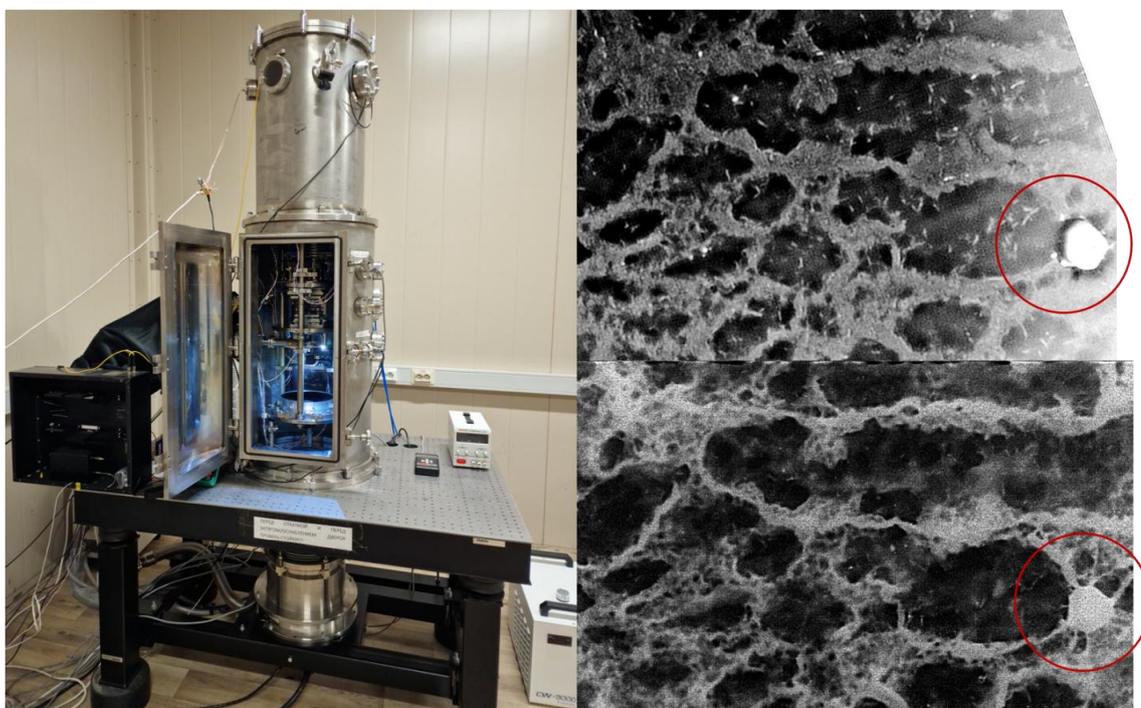


Рис. 1. Фотография микроскопа и срез легкого мыши. Справа - сравнение разрешающей способности конфокального (вверху, отмечено кружком) и ЭУФ (внизу) микроскопов.

Публикации:

1. Д.Г.Реунов, Н.С. Гусев, М.С. Михайленко, и др. ЖТФ, 2023, том 93, вып. 7, с. 1032-1036.
2. Д.Г.Реунов, И.В.Малышев, А.А.Перекалов, А.Н.Нечай, Н.И.Чхало. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2023, № 8, с.16–21. 7.
3. К.П. Гайкович, И.В. Малышев, Д.Г. Реунов, Н.И. Чхало. ЖТФ, 2023, том 93, вып. 7, с. 867-879.

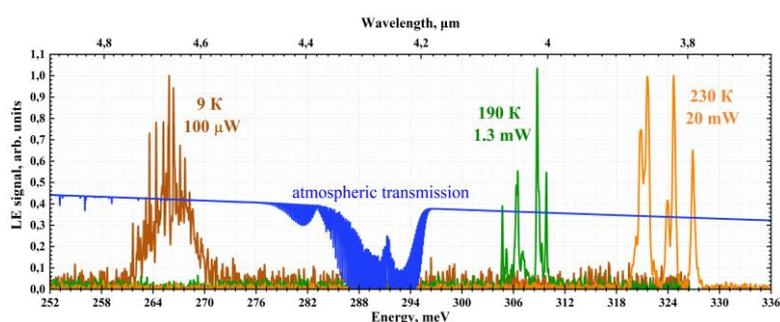
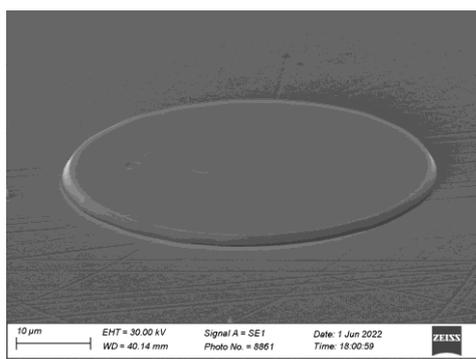
Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФМ РАН тема FFUF-2021-0022.

ПФНИ: 1.3.5.6. Новые оптические материалы, оптические элементы фотоники, интегральная оптика, голография, нанофотоника, метаматериалы и метаповерхности.

4. Дискковые лазеры на основе квантовых ям HgTe/CdHgTe

А.А. Разова, М.А. Фадеев, В.В. Румянцев, В.В. Уточкин, А.А. Дубинов, В.Я. Алешкин, Н.С. Гусев, Д.В. Шенгуров, Е.Е. Морозова, С.В. Морозов, В.И. Гавриленко (ИФМ РАН – филиал ИПФ РАН), Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий (ИФП СО РАН).

Получено лазерное излучение при оптической накачке в микродисковых резонаторах с квантовыми ямами на основе гетероструктур HgTe/CdHgTe. Длина волны излучения перестраивается от 4,6 мкм до 3,8 мкм в окне прозрачности атмосферы при изменении температуры от 9 К до 230 К, температуры достижимой при термоэлектрическом охлаждении.



а)

б)

Рис. 1. а) Изображение сканирующего электронного микроскопа исследуемого микродискового резонатора. б) Спектры лазерного излучения микродиска при различных температурах и мощностях накачки. Синим показан спектр аппаратной функции оптического тракта с учетом атмосферного поглощения.

Публикация:

А.А. Razova, М.А. Fadeev, V.V. Rumyantsev, et al. Whispering gallery mode HgCdTe laser operating near 4 μm under Peltier cooling / Applied Physics Letters, 2023. Vol. 123, № 16. P. 161105. <https://doi.org/10.1063/5.0171781>

ПФНИ: 1.3.5.6. Новые оптические материалы, оптические элементы фотоники, интегральная оптика, голография, нанофотоника, метаматериалы и метаповерхности

Работа выполнена в рамках проекта Министерства науки и высшего образования РФ (грант 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024)).

Натурные измерения центральной частоты вращательного перехода озона $J = 6_{1,5}-6_{0,6}$ с высокой точностью: референтная точка для создания новой микроволновой аппаратуры и тестирования спектроскопических моделей

А.А. Красильников, М.Ю. Куликов, М.В. Беликович, В.Г. Рыскин, А.А., Швецов, Н.К. Скалыга, Л.М. Кукин, А.М. Фейгин (ИПФ РАН)

Впервые проведены натурные измерения центра линии собственного излучения атмосферного озона вблизи 110,836 ГГц с рекордно высокой точностью (~12 кГц). Обработка длительных рядов спектров яркостной температуры позволила определить центральную частоту этой линии равной $110835,909 \pm 0,016$ МГц. Показано, что доплеровский сдвиг частоты горизонтальным ветром, а также вариации тропосферного поглощения не влияют на полученный результат. Найденное значение на 130 кГц меньше лабораторно измеренного и заметно отличается от расчетов современных моделей, но близко к результатам ранних полуэмпирических расчетов, проведенных более 40 лет назад. Найденная частота перехода озона $J = 6_{1,5} - 6_{0,6}$ может быть использована как референтная точка для создания новой микроволновой аппаратуры, нацеленной на измерение профиля озона и профиля зонального ветра в области мезопаузы, и тестирования современных полуэмпирических и квантово-химических методов и моделей.

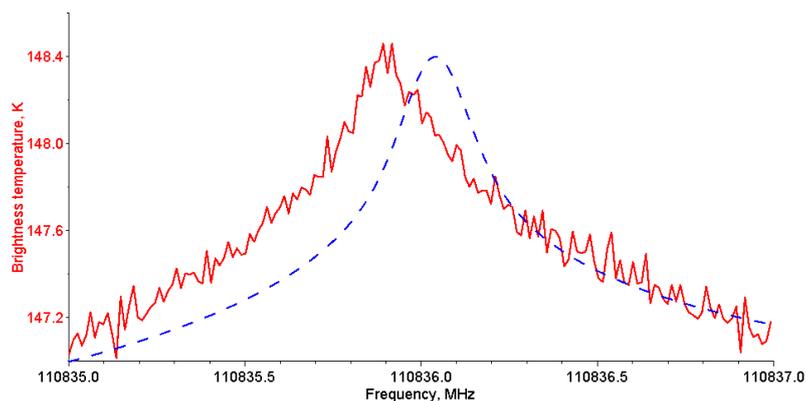


Рис.1. Левая панель: мобильный микроволновой озонметр ИПФ РАН с цифровым анализатором спектра, предназначенный для измерений профиля концентрации озона в диапазоне высот 20-70 км. Правая панель: спектр центральной части линии собственного излучения атмосферного озона, измеренный (красная линия) и модельный (синяя линия).

Публикации:

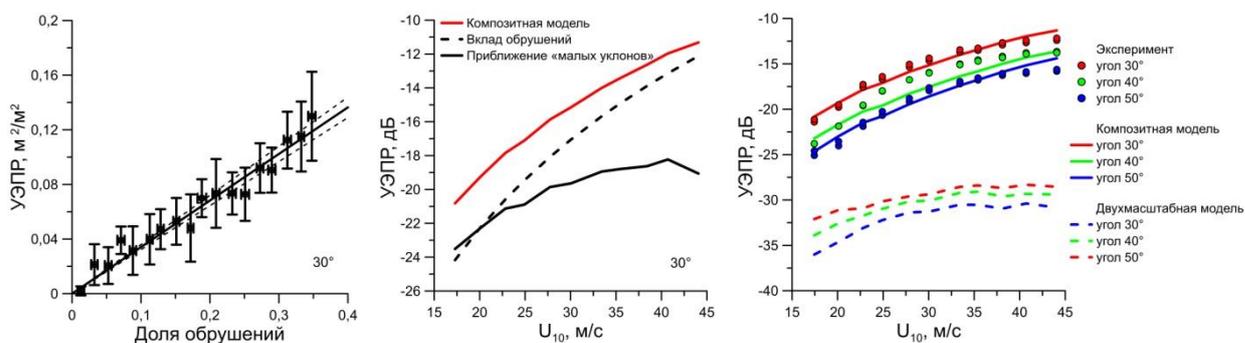
3. Kulikov M.Yu., Krasil'nikov A.A., Belikovich M.V., Ryskin V. G., Shvetsov A.A., Skalyga N.K., Kukikn L.M., and Feigin A.M., High precision measurements of resonance frequency of ozone rotational transition $J = 6_{1,5} - 6_{0,6}$ in the real atmosphere // *Remote Sensing*, 15, 2259, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15092259>. IF WOS 5, SCOPUS 7.9. Q1

Результат получен при поддержке Российского научного фонда, проект №22-12-00064 (<https://rscf.ru/project/22-12-00064/>), руководитель Куликов М.Ю., зав. лабораторией ИПФ РАН)

Композитная модель рассеяния радиоволн СВЧ-диапазона на водной поверхности при экстремальных скоростях ветра

Русаков Н. С., Байдаков Г. А., Троицкая Ю. И. (ИПФ РАН)

На основании экспериментов с использованием радиолокационных, оптических и контактных методов измерений показано, что удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) водной поверхности в ортогональную поляризацию линейно зависит от доли поверхности воды, покрытой обрушениями (рис. 1). С использованием полученной зависимости построена композитная модель рассеяния СВЧ-излучения на взволнованной водной поверхности, учитывающая вклад в УЭПР ветрового волнения в рамках приближения «малых уклонов» второго порядка. Показано, что монотонный рост УЭПР при высоких скоростях ветра связан с увеличением площади поверхности, занятой обрушениями, при этом вклад ветрового волнения стремится к насыщению, как на согласованной поляризации (рис. 2). Модель верифицирована на основе сопоставления с данными лабораторного эксперимента с использованием измеренных спектров волнения и доли поверхности воды, покрытой обрушениями (рис. 3). Найденные закономерности могут быть использованы для восстановления скорости ураганного ветра по дистанционным, в том числе, спутниковым радиолокационным измерениям.



Публикации:

1. Русаков Н. С., Байдаков Г. А., Троицкая Ю. И. Композитная модель рассеяния радиоволн СВЧ-диапазона на водной поверхности при экстремальных скоростях ветра // Доклады Российской академии наук. Науки о земле, 2023, том 513, № 1, с. 139–145
2. Rusakov N. S., Baidakov G. A., Kandaurov A. A., Troitskaya Yu. I. and Ermakova O. S. Laboratory Modelling of Microwave Signal Scattering by Breaking Surface Waves Under Strong Wind Conditions // 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2022), Kuala Lumpur, Malaysia, 2022, pp. 6955-6958, doi: 10.1109/IGARSS46834.2022.9883743.
3. Baydakov G. A., Rusakov N. S., Kandaurov A. A., Sergeev D. A., Troitskaya Y. I. Investigation of Wave Breaking by Radar Measurements in the Laboratory Modeling // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes—2022. PMMEEP 2022. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25962-3_45

Результат получен при поддержке Российского научного фонда проект 22-77-00076 «Исследование влияния пены на процессы обмена между океаном и атмосферой и рассеяние микроволнового излучения в экстремальных погодных условиях», руководитель Байдаков Г.А., науч. сотр. ИПФ РАН.