

I. ВАЖНЕЙШИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 2025 ГОДА

1. Короткоимпульсный прототип гиротрона для ЭЦРН плазмы в токамаке ТРТ

Г.Г. Денисов¹, А.Г. Литвак^{1,2}, М.Ю. Глявин¹, А.А. Ананичев¹, А.П. Фокин¹,
А.Н. Куфтин¹, А.В. Чирков^{1,2}, Е.М. Тай^{1,2}, Е.А. Солуянова^{1,2}, М.В. Морозкин^{1,2},
В.Н. Мануилов¹, В.Е. Запечалов¹, А.С. Зуев¹, А.С. Седов^{1,2}

¹ИПФ РАН, ²АО НПП “Гиком”

Создан прототип гиротрона нового поколения, предназначенный для электронно-циклотронного резонансного нагрева плазмы в перспективном российском токамаке ТРТ. На частоте 230 ГГц в режиме импульсов длительностью 100 мкс при частоте повторения 10 Гц на выходном окне гиротрона продемонстрирована мощность 940 кВт. В режиме без рекуперации энергии это соответствует КПД генерации 29%. Встроенный квазиоптический преобразователь нового типа (рис.1) позволяет с высокой эффективностью выводить моды обоих вращений (поляризаций), что подтверждается высоким содержанием гауссовой компоненты – более 99% в обеих поляризациях, а также осуществить ввод внешнего сигнала для работы в режиме захвата частоты гиротрона.

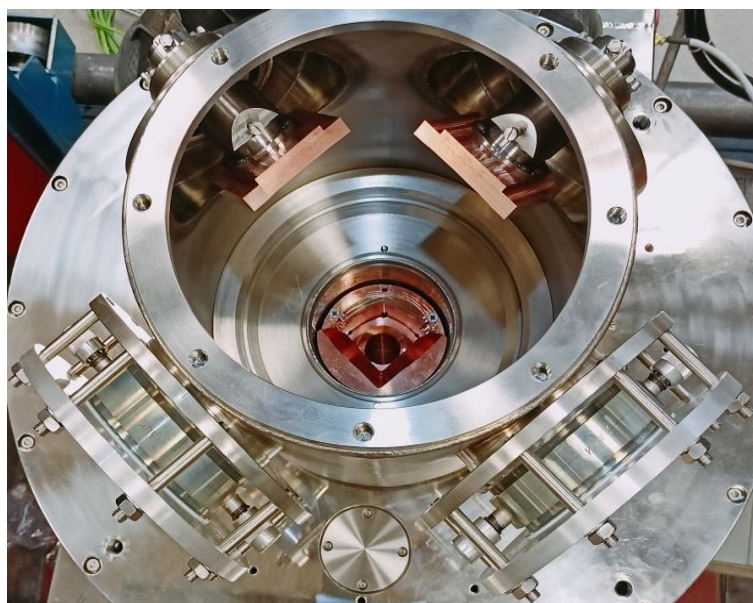


Рис.1 Фото встроенного двунаправленного квазиоптического преобразователя гиротрона

Публикация:

1. A.A.Ananichev, A.P.Fokin, A.N.Kuftin, V.N.Manuilov, L.G.Popov, A.V.Chirkov, E.M.Tai, M.V.Morozkin, M.Yu.Glyavin, G.G.Denisov. *Experimental Study of a Short-Pulse Prototype Megawatt-Power 230-GHz Gyrotron for the TRT Tokamak. IEEE Electron Device Letters* 46, 11, 2142-2144, 2025.

2. Перспективы лазерно-плазменного источника излучения для рентгеновской литографии на длине волны 11,2 нм.

А.Н. Нечай, В.Е. Гусева, А.А. Перекалов, С.С. Морозов, В.Н. Полковников, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало, И.С. Абрамов, Е.Д. Господчиков, А.Г. Шалашов, С.В. Голубев, И.И. Кузнецов, О.В. Палашов (ИПФ РАН)

Создан уникальный стенд для разработки лазерно-плазменного источника рентгеновского литографа нового поколения на длину волны 11,2 нм (рис. 1 а). Стенд включает сверхзвуковое сопло с системами подачи, контроля и откачки ксенона, твердотельный лазер с системой фокусировки излучения. Разработаны ключевые диагностики характеристик ЭУФ излучения: зеркальный спектрометр, высокоразрешающий спектрограф, рентгеновский микроскоп и квантометр. Экспериментально реализован разряд с размером излучающей области 100 мкм, достигнут коэффициент конверсии лазерного излучения в рентгеновское более 3%, сопоставимый с 7,5%, полученным путем моделирования идеализированных сценариев горения плазмы, и значимый для практического воплощения рентгеновского литографа (рис. 1 б).

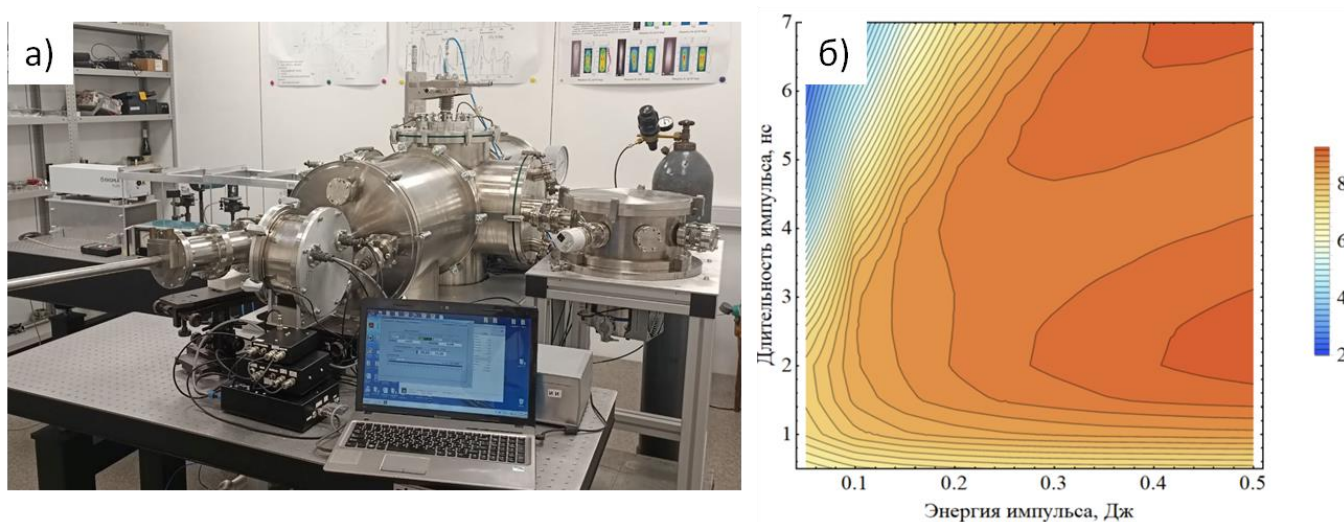


Рис. 1. Фотография стенда (а) и расчетный коэффициент конверсии [%] лазерно-плазменного источника с ксеноновой мишенью в зависимости от длительности и энергии импульса на длины волны 11,2 нм (б).

Публикации:

1. A.A. Perekalov, N.I. Chkhalo, V.E. Guseva et al. *Measurement Science and Technology*. **36**, 105415 (2025)
2. В.Е. Гусева, И.Г. Забродин, А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.И. Чхало. *ЖТФ*. **95**(7), 1283 (2025)
3. А.Н. Нечай, В.Е. Гусева, А.А. Перекалов, Н.И. Чхало. *ЖТФ*. **95**(7), 1289 (2025)
4. В.Е. Гусева, А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.И. Чхало. *ЖТФ*. **95**(9), 1647 (2025)
5. А.А. Перекалов, В.Е. Гусева, А.Н. Нечай, Н.И. Чхало, П.А. Вепрев, А.И. Артюхов. *ЖТФ*. **95**(9), 1639 (2025)
6. С.С. Морозов, М.Ю. Знаменский, С.А. Гарахин, М.В. Зорина, Д.Г. Реунов, Б.А. Уласевич, Н.И. Чхало. *ЖТФ*. **95**(10), 1879, (2025)
7. I.S. Abramov, S.V. Golubev, E.D. Gospodchikov, A.G. Shalashov, A.A. Perekalov, A.N. Nechay, and N.I. Chkhalo. *Phys. Rev. Applied*. **23**, 024004 (2025)
8. I.S. Abramov, E.D. Gospodchikov, A.G. Shalashov, S.V. Golubev, A.A. Perekalov, A.N. Nechay, and N.I. Chkhalo. *Phys. Rev. Letters* (2025), на рецензии.

3. Быстрая объёмная спектроскопическая оптоакустическая томография на основе широкополосной 512-элементной ультразвуковой антенны

П.В. Субочев, М.Б. Прудников, В.А. Воробьёв, А.А. Курников, А.Г. Орлова, А.Г. Санин, М.Ю. Кириллин, Р.И. Овсянников, А.С. Постникова, А.В. Харитонов, М.Д. Проявин, И.В. Турчин (ИПФ РАН); Ф.М. Эспиноза (CSIC, Испания), Ж. Чен (Tongji University, Китай) Х. Л. Дин-Бин, Д. Рязанский (ETH Zurich, Швейцария)

На основе пленки из поливинилиденфторида разработана 512-элементная сферическая ультразвуковая антенна с размером элементов $0,95 \text{ мм}^2$, обладающая рекордной полосой приемных частот (0,3–40 МГц). Новая антенна увеличивает отношение сигнал/шум более чем на порядок по сравнению с традиционными пьезокерамическими датчиками, обеспечивая быструю (2 Гц) спектроскопическую (690–850 нм) оптоакустическую диагностику изменений локальной оксигенации в кровеносных сосудах человека с изотропным пространственным разрешением 22–35 мкм в объеме $10 \times 10 \times 4 \text{ мм}^3$ (Рис. 1).

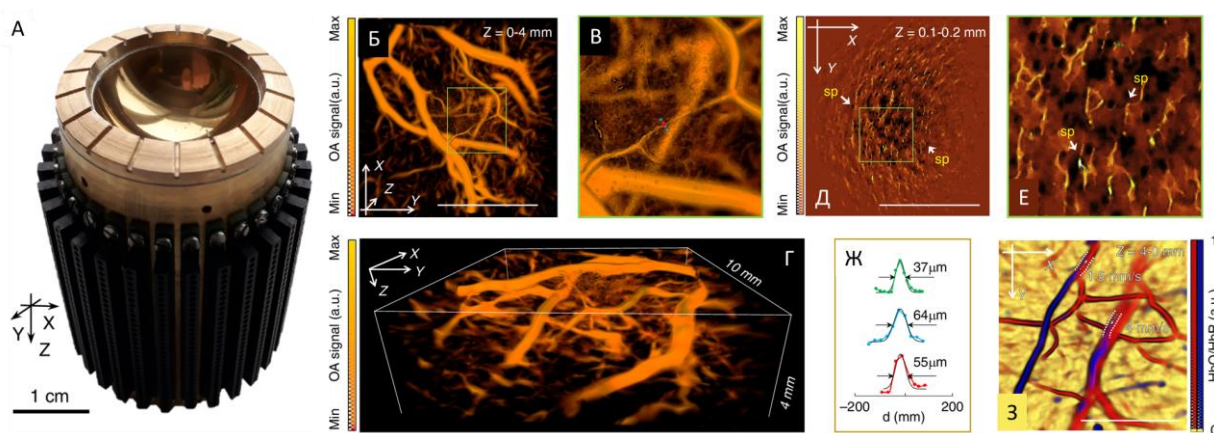


Рисунок 1. Быстрая объёмная спектроскопическая оптоакустическая томография ладони человека *in vivo*. (А) Внешний вид разработанной антенны. (Б–Ж) Объёмная ангиография сосудистой сети, полученная за один лазерный импульс (850 нм): (Б) проекция максимальной интенсивности, (В) увеличенный фрагмент, (Г) трехмерная визуализация, (Д–Е) Визуализация микроструктур на глубинах 100–200 мкм: поверхностные сосуды и протоки потовых желез (sp). (Ж) Профили сосудов, демонстрирующие высокое пространственное разрешение (FWHM 37–64 мкм). (З) Функциональная визуализация в реальном времени: карта насыщения крови кислородом (HbO/HbR) и измерение скорости кровотока внутри кровеносных сосудов.

Публикация:

1. Pavel V. Subochev, Xosé Luís Deán-Ben, Zhenyue Chen, Maxim B. Prudnikov, Vladimir A. Vorobev, Alexey A. Kurnikov, Anna G. Orlova, Anna S. Postnikova, Alexey V. Kharitonov, Mikhail D. Proyavin, Roman I. Ovsyannikov, Anatoly G. Sanin, Mikhail Y. Kirillin, Francisco Montero de Espinosa, Ilya V. Turchin, Daniel Razansky. Ultrawideband high density polymer-based spherical array for real-time functional optoacoustic micro-angiography. *Light: Science & Applications* 14, 239 (2025).

4. Новый метод визуализации диффузионного проникновения в биоткани на основе ОКТ-визуализации осмотических деформаций

В.Ю. Зайцев, А.Л. Матвеев, Л.А. Матвеев, А.А. Советский, Д.В. Шабанов (ИПФ РАН), Ю.М. Александровская (Terra Quantum, Germany), Е.М. Касьяненко (Курчатовский институт)

Предложен и апробирован новый метод визуализации диффузионного проникновения веществ в биоткани, основанный на оптической когерентной томографии (ОКТ). Проникновение большинства растворов в биоткани вызывает осмотические напряжения и деформации, которые визуализируются путем анализа последовательности ОКТ-сканов. Межкадровые деформации пропорциональны производной по времени от решения уравнения диффузии, а потому имеют выраженные отслеживаемые экстремумы, квадрат глубины которых пропорционален времени и коэффициенту диффузии. Из-за различий размеров/масс молекул воды и растворенного вещества скорости их диффузии значительно различаются, что позволяет одновременно селективно наблюдать диффузионные фронты проникающего вещества и уходящей из ткани подвижной воды (Рис 1.). На основе сильной зависимости характеристик диффузии от типа/состояния тканей, продемонстрирована перспективность метода для биомедицинской диагностики, а также для исследований в области фармакологии и косметологии.

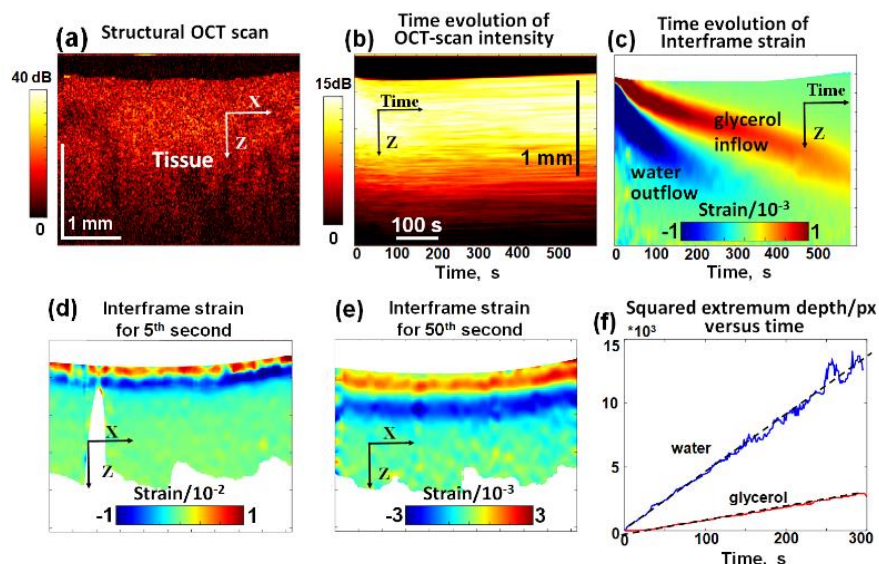


Рис.1. Пример визуализации проникновения 30% раствора глицерина в образец хрящевой ткани

Публикации:

1. Alexandrovskaya Y.M., Sovetsky A.A., Kasianenko E.M., Matveyev A.L., Matveev L.A., Baum O.I., and Zaitsev V. Y. *Advanced Drug Delivery Reviews* 217 (2025): 115484.
2. Zaitsev V.Y, Alexandrovskaya Y.M., Sovetsky A.A., Kasianenko E.A., Matveyev A.L., Shabanov D.V., Darvin M.E. *Cosmetics*, 12 (2025): 183(1-25).
3. Alexandrovskaya Y.M., et al. *Journal of Biophotonics* 17(7) (2024): 1–15.
4. Патент “Способ количественной визуализации диффузии в биологических тканях и биоподобных материалах” (В.Ю. Зайцев и др.) Свидетельство № 2846970 (2025 г.)

5. Запись однофотонных состояний в квантовой памяти на основе кристалла Eu:YSO

Р.А. Ахмеджанов, Л.А. Гуцин, И.В. Зеленский, В.А. Низов, Н.А. Низов, Д.А. Собгайда, (ИПФ РАН), А. А. Калачев, И. З. Латыпов, Д. А. Турайханов, Н. М. Шафеев, А. В. Шкаликов (КазНЦ РАН).

Продemonстрировано хранение одиночных фотонов, генерируемых в режиме спонтанного параметрического рассеяния в помещенном в резонатор кристалле РРКТР, в памяти на основе атомной частотной гребенки в кристалле $^{153}\text{Eu}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$. Получены сигналы эха для различных времен хранения с эффективностью до 7% (рис.1). Реализация долговременной квантовой памяти, согласованной по спектру с источниками одиночных фотонов и позволяющей эффективно их записывать и считывать (в перспективе по требованию), необходима для создания квантовых повторителей, которые станут ключевым элементом будущих дальнодействующих квантовых коммуникаций.

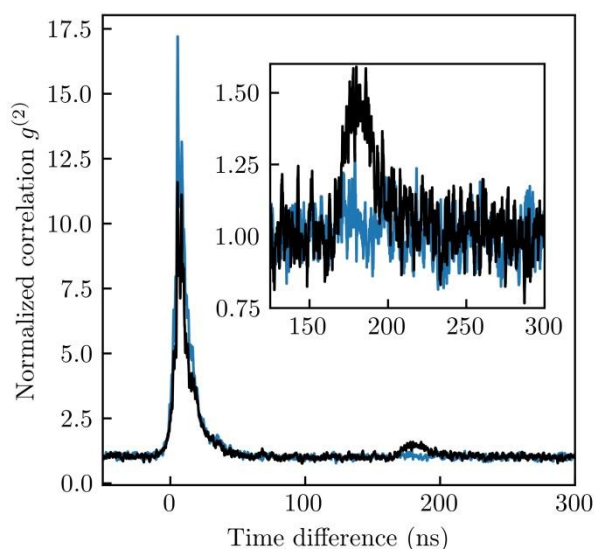


Рис.1. Корреляционная функция при наблюдении эха для гребенки с временем хранения 166 нс (черный) и в отсутствие поглощения (синий). На вставке более детально показана область эха.

Публикация:

1. Р.А. Ахмеджанов и др., «Запись и воспроизведение однофотонных состояний, генерируемых в режиме спонтанного параметрического рассеяния, в квантовой памяти на основе кристалла Eu:YSO», Письма в ЖЭТФ, 2025, том 122, вып.10, с.640–643.

6. Прототип детектора одиночных микроволновых фотонов на основе джозефсоновского контакта

А.Л. Панкратов, Л.С. Ревин, А.В. Чигинев (ИПФ РАН),
А.В. Гордеева, Д.А. Ладейнов, А.В. Благодаткин (НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

Впервые продемонстрировано детектирование одиночных фотонов на частотах 9 и 14 ГГц с эффективностью 45% и темновым счетом 0,1 Гц детектором на основе алюминиевых джозефсоновских контактов с нелинейным поведением в режиме фазовой диффузии. На основании суперпуассоновской статистики детектируемых фотонов сделано заключение об их тепловой природе. Показано, что использование режима фазовой диффузии позволяет до 40 раз (с 17 до 700 мК) увеличить рабочую температуру детектора на основе алюминиевых джозефсоновских контактов без потери его эффективности. Созданный детектор, имеющий энергетическое разрешение порядка 10 иДж (йоктоДжоулей, 10^{-24} Дж), может быть использован для поиска аксионов – гипотетических частиц темной материи.

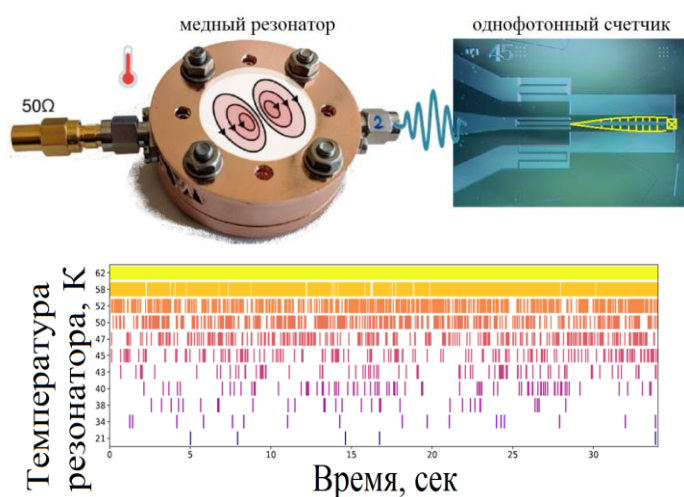


Рис. 1. Принципиальная схема измерения (сверху) и временные зависимости сигналов детектора при различных температурах резонатора (снизу).

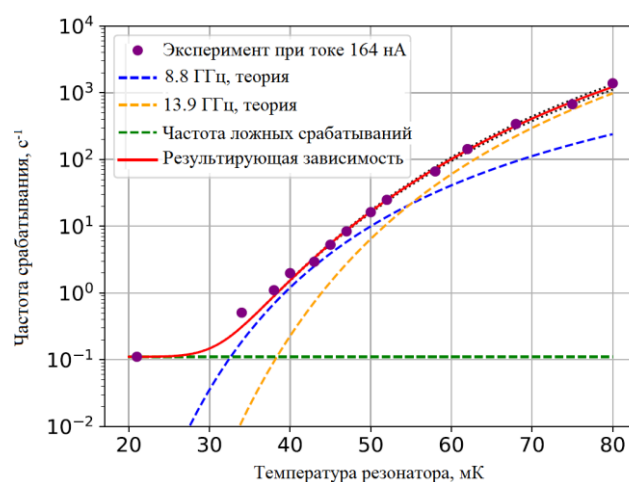


Рис. 2. Зависимость частоты срабатывания детектора от температуры резонатора в сравнении с теоретической кривой, описывающей темп эмиссии тепловых фотонов из резонатора распределением Планка.

Публикации:

1. A. L. Pankratov, A. V. Gordeeva, A. V. Chiginev, L. S. Revin, A. V. Blagodatkin, N. Crescini & L. S. Kuzmin, *Detection of single-mode thermal microwave photons using an underdamped Josephson junction*, *Nature Communications* 16, 3457, 2025.
2. D.A. Ladeynov, A.L. Pankratov, L.S. Revin, A.V. Gordeeva, A.V. Chiginev, S.A. Razov, E.V. Il'ichev, *Detection of 5 GHz photons using Al Josephson junctions at 0.7 K*, *Academia Quantum* 2, 7780, 2025.

7. Быстрая стабилизация гиротрона системой ФАПЧ

А.П. Фокин, А.А. Ананичев, Г.Ю. Голубятников, А.Н. Куфтин, А.В. Кирсанов,
А.С. Зуев, Е.М. Тай, Ю.В. Новожилова, А.Ф. Андриянов, Б.З. Мовшевич,
Г.Г. Денисов, М.Ю. Глявин (ИПФ РАН)

Разработаны, изготовлены и экспериментально протестированы (рис.1) импульсные (длительность импульса до 50 мкс) гиротроны с рабочими частотами 170 ГГц и 230 ГГц, предназначенные для захвата частоты мегаваттных гиротронов для нагрева и диагностики плазмы в установках УТС. Частота гиротрона стабилизирована с использованием специально разработанной (рис.2) системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Длительность установления стабилизированного режима генерации в эксперименте составила 10 мкс, при выходной мощности до 60 кВт, ширине линии излучения 100–200 кГц и диапазоне перестройки частоты 0,3 ГГц. Полученные режимы работы достаточны для обеспечения захвата частоты гиротронов мегаваттного уровня мощности в полосе 0,1 ГГц.



Рис.1 Фото экспериментального стенда

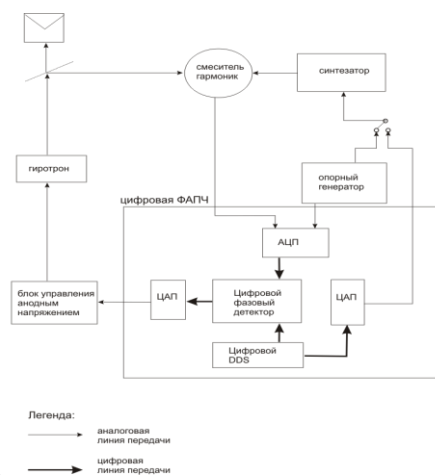


Рис.2 Блок-схема ФАПЧ

Публикации:

1. A.V.Kirsanov, A.P.Fokin, A.N.Kuftin, A.A.Ananichev, G.Yu.Golubiatnikov, B.Z.Movshevich, A.S.Zuev, V.N.Manuilov, E.M.Tai, M.Yu.Glyavin, G.G.Denisov. *Experimental Study of a Stabilized 230-GHz Gyrotron-Driver for Frequency Locking of Megawatt-Level Gyrotrons. IEEE Transaction of Electron Devices*, 72, 10, 5759-5762. DOI: 10.1109/TED.2025.3602037
2. A.P.Fokin, Yu.V.Novozhilova, A.S.Zuev, A.N.Kuftin, G.G.Denisov, M.Yu.Glyavin. *Comparison of Theoretical and Experimental Operating Regimes of 170 GHz 1MW Gyrotron Locked by the External Signal. IEEE Transaction of Electron Devices* 72, 11, 6288-6292. DOI:10.1109/TED.2025.3613296

8. Микродисковые HgCdTe лазеры диапазона 20–25 мкм

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

Созданы микродисковые лазеры на основе гетероструктур с HgCdTe квантовыми ямами, в которых получена лазерная генерация в рекордно длинноволновом диапазоне 20–25 мкм при оптической накачке излучением CO₂-лазера. Пороговая плотность мощности накачки, необходимая для наблюдения лазерной генерации составляет до 12 кВт/см², что позволяет осуществлять накачку лазерами с ваттным уровнем мощности. Лазерная генерация сохраняется вплоть до температуры 60 К.

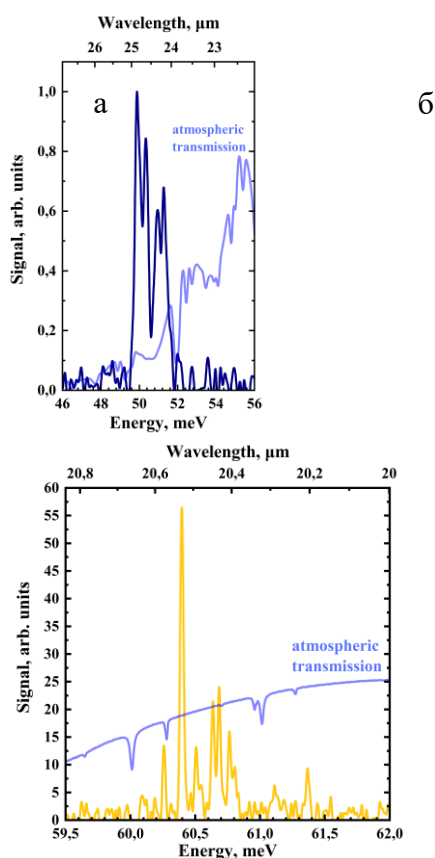


Рис.1. Спектры лазерной генерации микродиска m2 при температуре а) 10 К и б) 45 К и спектр пропускания атмосферы с разрешением 0.012 мэВ.

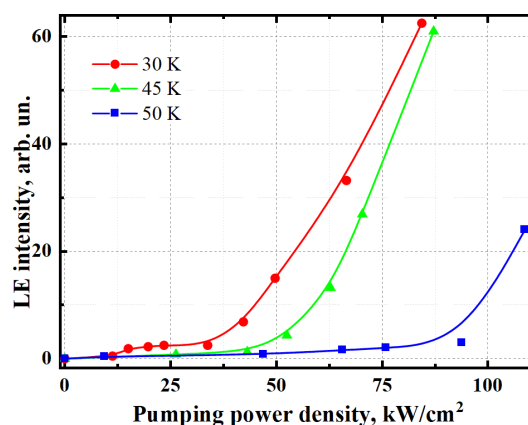


Рис.2. Зависимость сигнала от плотности мощности накачки при различных температурах для микродиска m2.

Публикация:

I. A. A. Razova, V. V. Rumyantsev, K. A. Mazhukina, V. V. Utochkin, M. A. Fadeev, A. A. Dubinov, V. Ya. Aleshkin, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretzky, D. V. Shengurov, N. S. Gusev, E. E. Morozova, V. I. Gavrilenko, S. V. Morozov. Microdisk HgCdTe lasers operating at 22–25 μm under optical pumping. *Appl. Phys. Lett.* **126**, 121102 (2025).

9. Высокоэффективный гиротронный выпрямитель для систем беспроводной передачи энергии

Г.Г. Денисов, С.В. Самсонов, М.Ю. Глявин, И.Г. Гачев, А.А. Богдашов, И.В. Зотова, И.В. Железнов, В.В. Маслов, А.П. Гаштури, В.Н. Мануилов, А.С. Сергеев
(ИПФ РАН)

Предложена и теоретически обоснована концепция (рис.1) инвертированного гиротрона (гиротрона-выпрямителя), позволяющего преобразовывать принимаемое СВЧ излучение на частоте 95 ГГц мощностью до 1 МВт в мощность постоянного тока с рекордной эффективностью до 80%. В экспериментах на частоте 34 ГГц при мощности падающего излучения около 13 кВт подтверждена возможность достижения КПД преобразования 80% (с учетом мощности, затрачиваемой на генерацию электронного пучка).

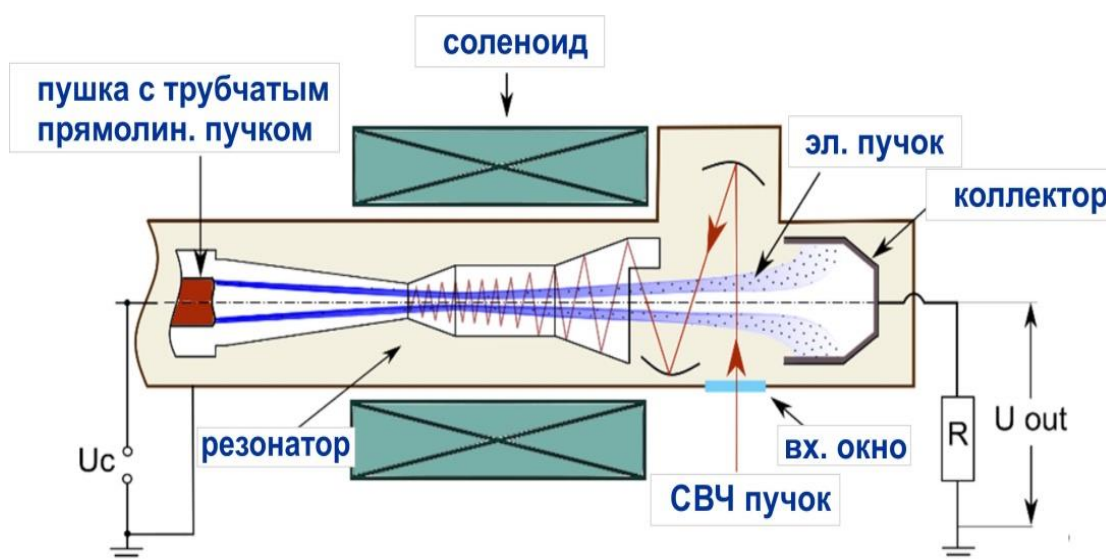


Рис.1 Принципиальная схема инвертированного гиротрона

Публикация:

I. S.V. Samsonov, G.G. Denisov, A.A. Bogdashov, I.G. Gachev, M.Y. Glyavin, I.V. Zheleznov, I.V. Zotova, V.V. Maslov «Ka-band Inverted Gyrotron with 80% Efficiency of Microwave-to-DC Power Conversion», *IEEE Electron Device Letters*, 46, 11, 2142-2144, 2025.

10. Микроволновые детекторные диоды на основе монокристаллической низкобарьерной гетероструктуры Al/AlGa_N/Ga_N

Н.В. Востоков, М.Н. Дроздов, М.А. Калинин, С.А. Королев, С.А. Краев, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин, П.А. Юнин (ИПФ РАН).

На основе монокристаллической гетероструктуры Al/AlGa_N/Ga_N разработан и изготовлен низкобарьерный диод Шоттки. Диод предназначен для детектирования слабых микроволновых сигналов без необходимости использования внешнего источника постоянного тока. Параметры диода, вольт-ваттная чувствительность 12,9 кВ/Вт и эквивалентная мощность шума 0,95 пВт/√Гц на частоте 94 ГГц, являются рекордными для детекторных Ga_N-диодов.

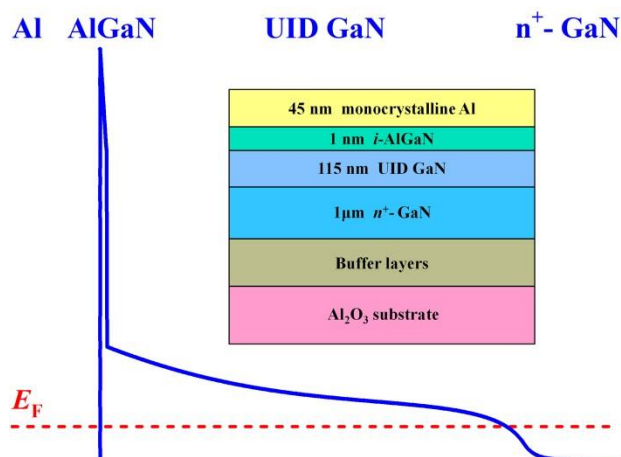


Рис. 1. Положение дна зоны проводимости и уровня Ферми в низкобарьерной диодной Al/AlGa_N/Ga_N гетероструктуре. На вставке — схема слоев гетероструктуры.

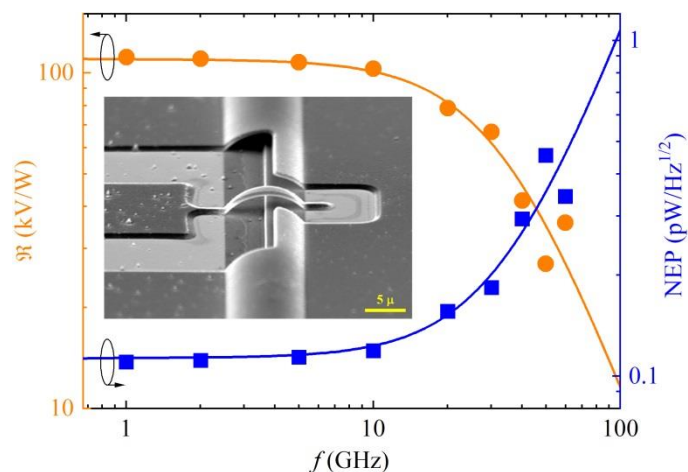


Рис. 2. Частотные зависимости вольт-ваттной чувствительности и NEP полученного микроволнового диода. На вставке — диод, интегрированный в отрезок копланарного волновода.

Публикации:

1. Н. В. Востоков, М. Н. Дроздов, М. А. Калинин, С. А. Краев, Д. Н. Лобанов, П. А. Юнин. Диоды Шоттки на основе монокристаллических гетероструктур Al/AlGa_N/Ga_N для микроволнового детектирования с нулевым смещением. *ЖТФ*, **95**, 1148 (2025).
2. N. V. Vostokov, S. A. Korolyov, S. A. Kraev, D. N. Lobanov. Zero-Bias Microwave Detector Diodes Based on All-Epitaxial Al/AlGa_N/Ga_N Heterostructures. *IEEE Trans. Electron Devices* (направлено в печать)

11. Мощный Yb:YAG лазер с когерентным сложением каналов

И.И. Кузнецов, С.А. Чижов, Н.И. Карпов, И.С. Бабер, О.В. Палашов (ИПФ РАН)

Предложена и разработана новая архитектура лазерной системы с 4-канальным усилителем на единственном кристалле Yb:YAG (рис. 1). Реализовано когерентное сложение 4 каналов по принципу мозаично заполненной апертуры с использованием цифровой системы выравнивания фазы излучения в каналах, максимизирующей интенсивность суммарного пучка в дальней зоне. СКО остаточных флуктуаций интенсивности составило $<1\%$. На выходе системы достигнута энергия импульсов 17 мДж при средней мощности 20 Вт, что соответствует предпробойному режиму работы.

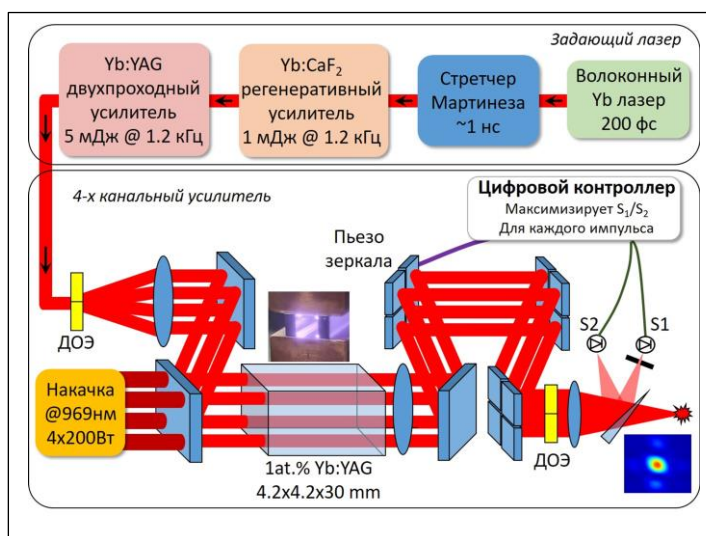


Рис. 1. Схема 4-канального Yb:YAG лазера.

Публикации:

1. I. Kuznetsov, S. Chizhov, D. Trunov, P. Smolin, N. Karpov, O. Palashov, "MOPA laser system with a 4-channel Yb:YAG single-rod amplifier and coherent beam combining," *Optics Letters* 50, 3158-3161 (2025).
2. Е.Г. Бурмистров, И.И. Кузнецов, П.А. Смолин, Ю.С. Федосенко "Автоматическое управление сложением лазерных пучков для реализации лучевых технологий высокой мощности в судостроительном производстве", *Морские интеллектуальные технологии* № 4-2 (66), С 107-113 (2024).

12. Лабораторно-астрофизическое исследование эффектов магнитного структурирования неравновесной плазмы, создаваемой фемтосекундными лазерными импульсами релятивистской интенсивности

Земсков Р.С., Перевалов С.Е., Котов А.В., Мурзанов А.А., Корытин А.И., Бурдонов К.Ф., Коржиманов А.В., Деришев Е.В., Блинов Е.С., Гинзбург В.Н., Кочетков А.А., Кузьмин А.А., Шайкин И.А., Яковлев И. В., Стукачев С.Е., Шайкин А.А., Хазанов Е.А., Степанов А.Н., Соловьев А.А., Стародубцев М.В. (ИПФ РАН), Барков М.В. (ИНАСАН, Россия); Fuchs J. (LULI – CNRS, France).

На мультитераваттном лазерном комплексе PEARL реализован новый подход к лабораторной астрофизике, основанный на создании и исследовании неравновесной плазмы фемтосекундными импульсами. Установлено, что такие плазменные потоки обладают высокой степенью коллимации, связанной с действием самосгенерированных магнитных полей, и принципиально отличаются по динамике от «наносекундных». Впервые показано, что сильные собственные магнитные поля «фемтосекундной» плазмы приводят к формированию магнитных ударных фронтов и стагнации встречных потоков (рис. 1) – эффектов, ранее не наблюдавшихся. Полученные результаты открывают новые возможности для воспроизведения в лаборатории ключевых процессов, характерных для экстремальных астрофизических объектов.

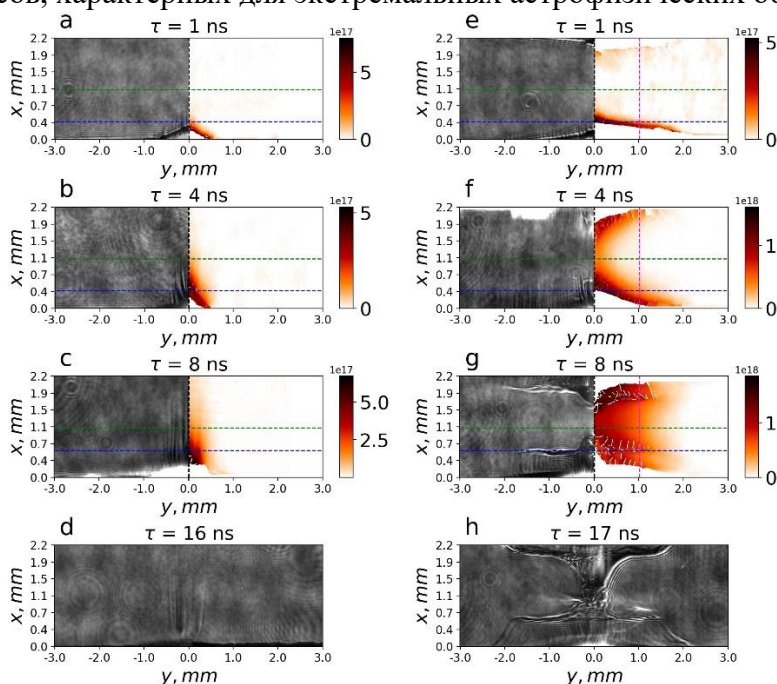


Рис. 1. Экспериментально полученные теневые фотографии и распределения концентрации плазмы при разлете единственного потока (a-d) и встречных потоков (e-h).

Публикации:

1. Zemskov R. S., Perevalov, S. E., Kotov, A. V. et al. Magnetic stagnation of two counterstreaming plasma jets induced by intense laser //Matter and Radiation at Extremes. (Q1, IF 4.7) – 2026. – Vol. 11. – №. 1.
2. Zemskov R. S., Barkov, M. V., Blinov, E. S., et al. Non-Ideal Hall MHD Rayleigh–Taylor Instability in Plasma Induced by Nanosecond and Intense Femtosecond Laser Pulses //Plasma. (Q2, IF 1.7) – 2025. – Vol. 8. – №. 2. – C. 23.