

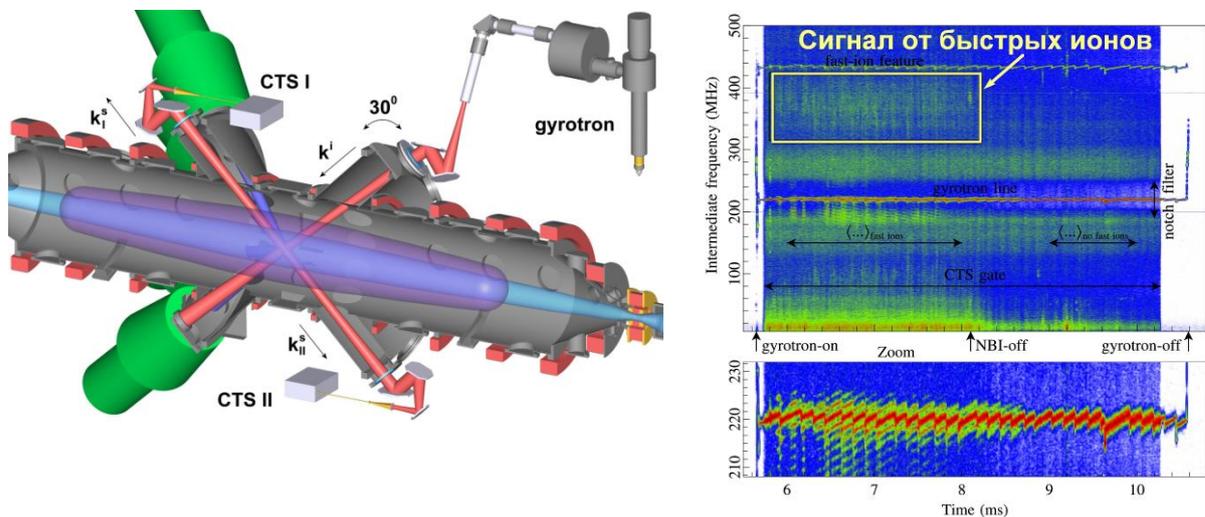
ВАЖНЕЙШИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 2022 ГОДА

1. Диагностика быстрых ионов методом коллективного томсоновского рассеяния микроволнового излучения в открытой магнитной ловушке ГДЛ

А. Г. Шалашов*, Е. Д. Господчиков, Л. В. Лубяко, О. Б. Смолякова, Т. А. Хусаинов (ИПФ РАН), А. Л. Соломахин, Д. В. Яковлев (ИЯФ СО РАН им. Г. И. Будкера).

*E-mail: ags@ipfran.ru,

Для крупномасштабной магнитной ловушки ГДЛ (ИЯФ СО РАН им. Г. И. Будкера) разработана и реализована в пилотных экспериментах система регистрации спектров коллективного рассеяния микроволнового излучения, позволяющая исследовать функцию распределения быстрых ионов по скоростям и неустойчивости высокотемпературной плазмы с субтермоядерными параметрами. Создан диагностический комплекс, включающий мощный 450 кВ / 54,5 ГГц гиротрон в качестве источника зондирующего излучения, два независимых высокочувствительных радиометра диапазона $54,47 \pm 0.55$ ГГц для одновременной регистрации рассеянного излучения в «ортогональных» геометриях, квазиоптические системы фокусировки зондирующего и рассеянного излучения. Развита методика для моделирования распространения и рассеяния микроволнового излучения в неоднородной плазме с необходимой для интерпретации эксперимента точностью.



Система регистрации рассеяния излучения гиротрона для ГДЛ и динамический спектр коллективного рассеяния на флуктуациях электронной плотности, включающий информацию о распределении быстрых ионов по скоростям

- [1] A.G. Shalashov, E.D. Gospodchikov, T.A. Khusainov, L.V. Lubyako, A.L. Solomakhin, D.V. Yakovlev. First results of collective Thomson scattering diagnostic of fast ions at the GDT open magnetic trap. *Phys. Plasmas*. Vol. 29. P. 080702 (2022).
- [2] А.Г. Шалашов, Е.Д. Господчиков, Л.В. Лубяко, Т.А. Хусаинов, А.Л. Соломахин, М.Е. Викторов. Диагностика быстрых ионов методом коллективного томсоновского рассеяния микроволнового излучения в открытой магнитной ловушке ГДЛ. *Изв. вузов: Радиофизика*. Т.65 № 5-6. С. 353–369 (2022).
- [3] Е. Д. Господчиков, Т. А. Хусаинов, А. Г. Шалашов. О рассеянии микроволновых пучков с конечной апертурой на флуктуациях плотности в неоднородной магнитоактивной плазме. *Физика плазмы*. Т. 48 №3. С. 222-236 (2022).
- [4] A.G. Shalashov, E.D. Gospodchikov, T.A. Khusainov, L.V. Lubyako, A.L. Solomakhin, M.E. Viktorov. Development of fast-ion collective Thomson scattering diagnostics for the GDT experiment. *Journal of Instrumentation*. Vol. 16. P07007 (2021).
- [5] A.G. Shalashov, E.D. Gospodchikov, T.A. Khusainov, L.V. Lubyako, O.B. Smolyakova, A.L. Solomakhin. Collective Thomson scattering diagnostic for the GDT open magnetic trap. *Plasma Phys. Control. Fusion*. Vol. 62. P. 065010 (2020).

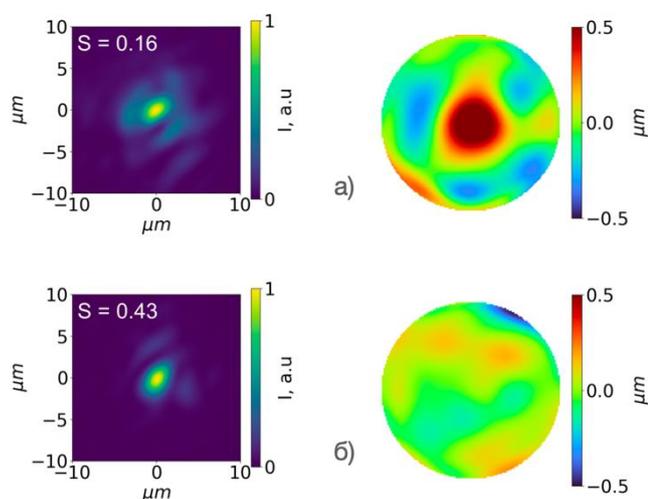
Грант РФФИ № 19-72-20139

ПФНИ: 1.3.4.1. Физика высокотемпературной плазмы и управляемый ядерный синтез.

2. Фокусировка петаваттного лазерного импульса после посткомпрессии при помощи адаптивной оптической системы

Авторы: Соловьев А.А., Котов А.В., Мартьянов М.А., Перевалов С.Е., Земсков Р.С., Стародубцев М.В., Яковлев И.В., Гинзбург В.Н., Кочетков А.А., Шайкин И.А., Кузьмин А.А., Стукачов С.Е., Миронв С.Ю., Шайкин А.А., Хазанов Е.А.

Впервые продемонстрировано, что нелинейные искажения волнового фронта петаваттного фемтосекундного лазерного импульса, сжатого по технологии CafCA (Compression after Compression Approach), можно эффективно корректировать при помощи деформируемого зеркала и датчика волнового фронта гартмановского типа. Таким образом, CafCA позволяет не только многократно поднять пиковую мощность лазерного импульса при сохранении его энергии, но и пропорционально увеличить интенсивность излучения в фокусе. В экспериментах с фокусирующей системой F/2,5 получена пиковая интенсивность в 52% от теоретического предела.



Распределения светового потока в области фокуса (слева) и искажений волнового фронта (справа) без коррекции (а) и с коррекцией (б) волнового фронта.

Публикации:

1. Soloviev A. et al. // *Optics Express*. – 2022. – V. 30. – №. 22. – P. 40584-40591
2. Martyanov M. et al. // *JOSA B*. – 2022. – V. 39. – №. 7. – P. 1936-1944.

Контактный автор: Соловьев Александр Андреевич, e-mail: so_lo@ipfran.ru

Финансирование: РФФ, проект № 20-62-46050; РФФИ/Росатом, проект № 20-21-00023.

ПФНИ:

- 1.3.5.1. Взаимодействие лазерного излучения с веществом, в том числе в сверхсильных полях; создание лазеров сверхкоротких сверхмощных импульсов излучения.
- 1.3.5.5. Физика лазеров и лазерных материалов; нелинейные оптические явления.

3. Прецизионная ионно-пучковая обработка поверхности оптических элементов на основе монокристаллического кремния

Для источников синхротронного излучения СКИФ (Кольцово, Россия) и ESRF (Гренобль, Франция) разработана методика ионно-пучковой обработки поверхности монокристаллического кремния, применяемого в кристалл-монокроматорах и элементах асферической оптики. Методика основана на использовании ионов с энергией, достаточной для аморфизации поверхностного слоя кремния, что значительно снижает зависимость скорости травления от угла падения ионов и подавляет развитие шероховатости поверхности при ионном распылении. Эффективность методики продемонстрирована на примере Si(110) кристалл-монокроматора, ошибка формы и шероховатость поверхности которого были уменьшены более чем на порядок по сравнению с ранее достигнутыми значениями.

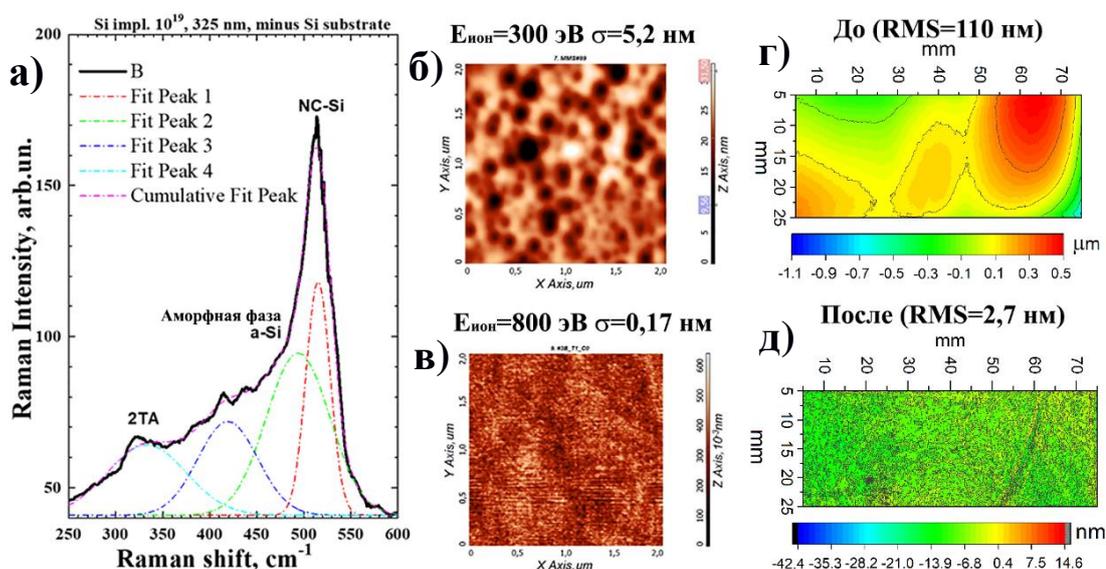


Рис.1. Ионно-пучковая обработка монокристаллического кремния. а) Спектр комбинационного рассеяния ($\lambda=325$ нм); б) АСМ кадр (травление при $E_{\text{ион}}=300$ эВ); в) АСМ кадр (травление при $E_{\text{ион}}=800$ эВ); г) Карта поверхности кристалл-монокроматора до коррекции; д) Карта поверхности кристалл-монокроматора после коррекции.

Авторы:

М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, М.В. Зорина, Н. Кумар, И.В. Малышев, Н.Н. Салашенко, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало (chkhalo@ipmras.ru) (ИФМ РАН)

Публикации:

1. М.С. Михайленко и др., Журнал технической физики, 92(8), 1219-1223 (2022).
2. M.S. Mikhailenko et al., Applied Optics, 61(10), 2825-2833 (2022).
3. A.K. Chernyshev et al., Applied Optics, 61(33), 9879-9887 (2022).
4. N. Kumar et al., Nuclear Instruments & Methods B, 534, 97-102 (2023).

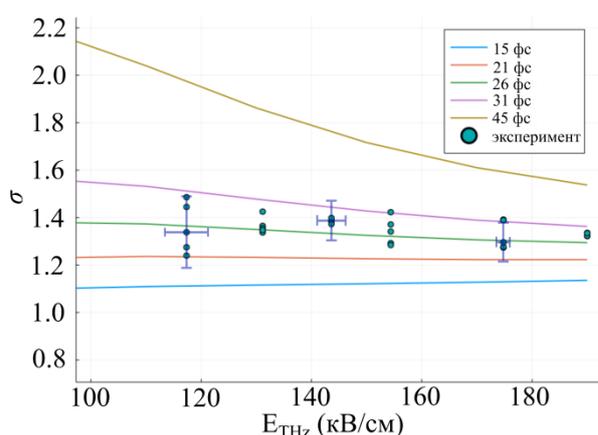
ПФНИ: 1.3.2.6. Физика поверхности, границ раздела и других протяженных дефектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-72-30029.

4. Нелинейная электродинамика и кинетика электронов в графене на фемтосекундных временных масштабах

Авторы: Бодров С.Б., Корытин А.И., Коржиманов А.В., Мурзанев А.А., Оладышкин И.В., Сергеев Ю.А., Степанов А.Н., Токман М.Д. (ИПФ РАН)

Проведено комплексное исследование нелинейных электродинамических свойств графена, облучаемого мощными оптическими и терагерцовыми импульсами. Впервые экспериментально обнаружена и теоретически объяснена поляризованная спонтанная оптическая эмиссия графена под действием интенсивного терагерцового излучения, на основе чего уточнена динамика неравновесной функции распределения электронов. Установлено, что характерное время релаксации направленного импульса носителей заряда уменьшается более чем на порядок (до 20–30 фс) относительно случая воздействия слабых электрических полей. Применение эффекта люминесценции графена в сильном ТГц поле позволило получить двумерные оптические изображения сфокусированных терагерцовых пучков и визуализировать усиление электрического поля на металлическом острие с радиусом кривизны 2 мкм. Также экспериментально исследовано возникновение оптической нелинейности второго порядка в графене, находящемся в сильном терагерцовом поле. Развита аналитическая теория эффекта, лежащая за пределами стандартной теории возмущений и позволяющая количественно объяснить наблюдаемую генерацию второй оптической гармоники.



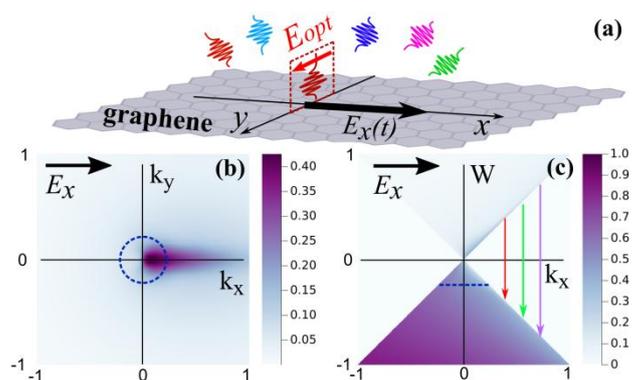
Зависимость анизотропии поляризации оптического излучения σ от максимума амплитуды ТГц поля (фотоны детектируется в диапазоне 350-1050 нм). Кружки – экспериментальные данные; цветные кривые – результаты численного моделирования для различных времен релаксации (на вставке).

Публикации:

I. V. Oladyshkin, S. B. Bodrov, A. V. Korzhimanov, A. A. Murzanev, Yu. A. Sergeev, A. I. Korytin, M. D. Tokman, and A. N. Stepanov. Polarized light emission from graphene induced by terahertz pulses// Phys. Rev. B **106**, 205407 (2022).

Финансирование: Государственное задание ИПФ РАН, проект № 0030-2021-0012.

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



(a) Геометрия задачи: ТГц электрическое поле направлено вдоль оси x . (b) Распределение электронов в k -пространстве зоны проводимости в момент максимума ТГц поля (190 кВ/см). (c) Зависимость энергии электронов от k_x ; цветные стрелки – возможные межзонные переходы.

5. Гирумножители на высоких циклотронных гармониках как источники мощного непрерывного излучения суб-терагерцового и терагерцового диапазонов

Г.Г. Денисов, И.В. Зотова, М.Ю. Глявин*, Р.М. Розенталь, А.С. Сергеев, А.П. Фокин, В.И. Белоусов, М.Ю. Шмелев, А.В. Чирков, А.И. Цветков, И.В. Бандуркин, А.М. Малкин, И.В. Железнов (ИПФ РАН)

*e-mail: glyavin@ipfran.ru

Показано, что в гиротронах при генерации мощного излучения на основном циклотронном резонансе одновременно можно обеспечить эффективное возбуждение циклотронных гармоник с номерами $s=4n+1$ ($n=1,2,3\dots$), что обусловлено специфическим свойством мод цилиндрических волноводов, согласно которому выполняются условия одновременного резонанса электронного пучка с двумя ТЕ-модами на разных гармониках. Эффект подтвержден в proof-of-principle эксперименте, в котором впервые продемонстрировано возбуждение пятой циклотронной гармоники в киловаттном гиротроне с рабочей частотой 45 ГГц. Мощность излучения на частоте 225 ГГц составила 100 мВт. Согласно проведенному анализу, в существующих мегаваттных гиротронах мощность излучения на пятой гармонике в диапазоне 0,8–1,3 ТГц может достигать десятков Ватт. Для расширения области возбуждения высоких гармоник может использоваться внешний сигнал. Найденный эффект открывает возможность создания источников непрерывного суб-ТГц и ТГц излучения высокой мощности.

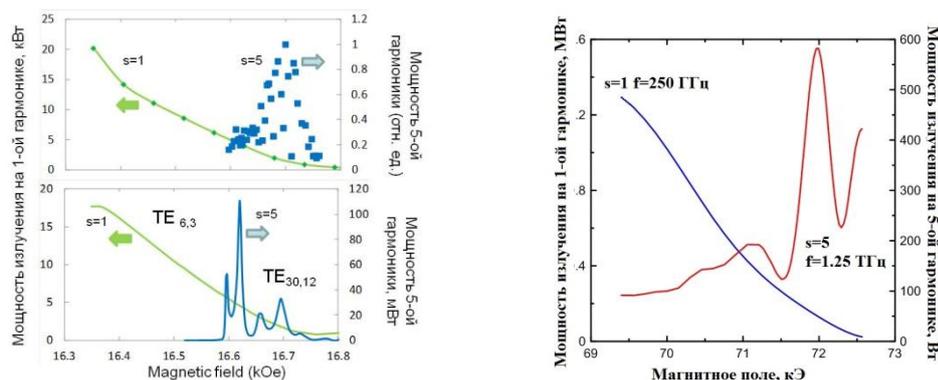


Рис.1 Экспериментальная (слева, сверху) и расчетная (слева, внизу) зависимости выходной мощности от магнитного поля для кВт гиротрона. Справа – расчетная зависимость мощности от магнитного поля для МВт гиротрона

1. G.G. Denisov, I.V. Zotova, A.M. Malkin, A.S. Sergeev, R.R. Rozental, A.P. Fokin, V.I. Belousov, M.Yu. Shmelev, A.V. Chirkov, A. I. Tsvetkov, I.V. Bandurkin, and M.Yu. Glyavin, “Boosted excitation of the fifth cyclotron harmonic based on frequency multiplication in conventional gyrotrons”, *Physical Review E*, 2022, DOI: 10.1103/PhysRevE.106.L023203
2. G.Denisov, I.Zotova, I.Zheleznov, A.Malkin, A.Sergeev, R.Rozental, M.Glyavin, “Towards Watt-Level THz Sources for High-Resolution Spectroscopy based on 5th-Harmonic Multiplication in Gyrotrons”, *Applied Science*, 2022, DOI: 10.3390/app122211370

ПФНИ: 1.3.6. Радиофизика и электроника, акустика

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

Работа выполнена в рамках субсидии на выполнение государственного задания ИПФ РАН по проекту «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона» комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации до 2024 года».

6. Моделирование главной стадии молнии

Разработана самосогласованная физическая и численная модель главной стадии молнии, результаты которой протестированы путем сравнения с данными ряда лабораторных экспериментов. Радиус канала и динамика ударной волны, а также радиальные распределения температуры и электронной концентрации хорошо согласуются с экспериментальными данными, причем для токов выше 100 кА принципиальным является учет пинч-эффекта. Экспериментально исследована динамика свечения длинного искрового разряда в сквозной фазе и фазе обратного удара с помощью стрик-камер и синхронного измерения тока. Измерены скорости лидеров в сквозной фазе и скорости быстрой и медленной волн светимости искрового канала на стадии обратного удара. Обнаружено, что канал разряда в области соединения положительного и отрицательного лидеров всегда расщеплен, а яркость канала в области встречи лидеров ослаблена. Таким образом, в экспериментах с длинной искрой впервые показано, что свойства общей стримерной зоны лидеров и характеристики процесса формирования канала во время встречи лидеров существенным образом влияют на параметры импульса тока главной стадии, который является источником всех основных поражающих факторов молнии.

Н.А.Богатов, Е.А.Мареев (ИПФ РАН),

А.Н.Бочаров (ОИВТ РАН), Н.А.Попов (НИИЯФ МГУ), В.С.Сысоев, Д.И.Сухаревский, А.И.Орлов (ВНИЦ РФЯЦ ВНИИТФ).

Публикации:

1. N. A. Bogatov, V. S. Syssoev, D. I. Sukharevsky, A. I. Orlov, V. A. Rakov, E. A. Mareev. An Experimental Study of the Breakthrough-Phase and Return-Stroke Processes in Long Sparks, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, DOI: 10.1029/2021JD035870.
2. A.N. Bocharov, E. A. Mareev and N A Popov, Numerical simulation of high-current pulsed arc discharge in air, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022. Volume 55, Number 11, 115204, DOI 10.1088/1361-6463/ac3866.

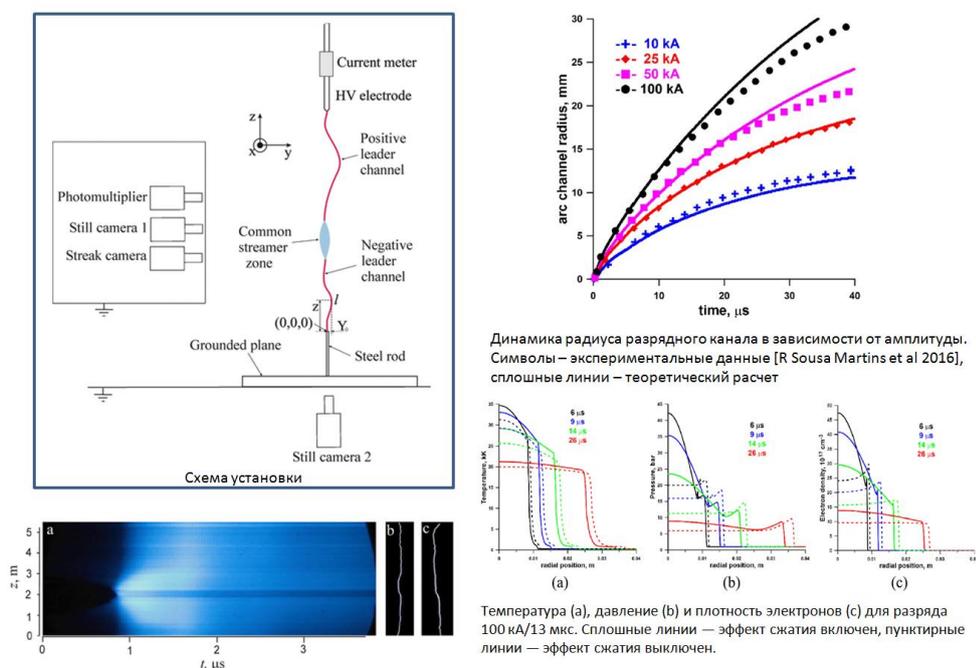


Рис.1. Слева: схема экспериментальной установки и фотография модельного разряда, сделанная стрик-камерой. Справа: динамика разрядного канала в численной модели главной стадии молнии

Результат получен при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00218).

ПФНИ: 1.3.4.3. Плазменные процессы в геофизике и астрофизике.

7. Высокоэффективный гиротронный комплекс для микроволновых технологий

М.Д. Проявин, М.В. Морозкин, В.Н. Мануилов, Е.А. Солюянова, Е.М.Тай,
М.В. Каменский, А.А. Орловский, Д.И. Соболев, М.Ю. Глявин* (ИПФ РАН)
*e-mail: glyavin@ipfran.ru

Для технологических гиротронных комплексов, работающих при комнатной температуре, разработан соленоид с ферромагнитными экранами, что позволяет значительно снизить энергопотребление магнитной системы. Результирующий КПД всего комплекса составил 32%, что в 1,5 раза превышает аналогичный параметр для существующих комплексов. На базе этой магнитной системы разработан технологический гиротронный комплекс нового поколения, способный осуществлять генерацию излучения на частотах 28, 35, 45, 95 ($s = 2$) ГГц при уровне выходной мощности в десятки кВт.

В режиме 28 ГГц продемонстрирована устойчивая долговременная генерация рабочей моды на основном циклотронном резонансе с мощностью 25 кВт при энергопотреблении соленоида 13 кВт (магнитное поле 1 Тл). Эффективность генерации достигает 55% без рекуперации остаточной энергии электронного пучка.



Рис.1 Технологический гиротрон в магнито-экранированном соленоиде на испытательном стенде

1. M.D. Proyavin, M.V. Morozkin, V.N. Manuilov, E.A. Soluyanov, E.M. Tai, M.V. Kamenskiy, A.A. Orlovskiy, D.I. Sobolev, M.Yu. Glyavin. Results of the study of a new generation technological gyrotron system with high power and efficiency. Electron Device Letters, 2022 DOI: 10.1109/LED.2022.3222169

ПФНИ: 1.3.6. Радиофизика и электроника, акустика

Работа выполнена в рамках субсидии на выполнение государственного задания ИПФ РАН по проекту «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона» комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации до 2024 года».

8. Инновационная разработка безмасочного рентгеновского литографа для мелкосерийного производства компонент микро- и нанoeлектроники

Разработан облик безмасочного рентгеновского литографа на основе точечного лазерно-плазменного источника излучения на 13,5 нм и микроэлектромеханической системы микрозеркал в качестве динамической маски. Созданный проекционный трехзеркальный объектив с 400-кратным уменьшением обеспечивает разрешение литографа до 20 нм. Подтверждены основные принципы, заложенные в конструкцию безмасочного рентгеновского литографа, что позволяет приступить к этапу опытно-конструкторских работ по разработке литографа для мелкосерийного производства компонент микро- и нанoeлектроники.

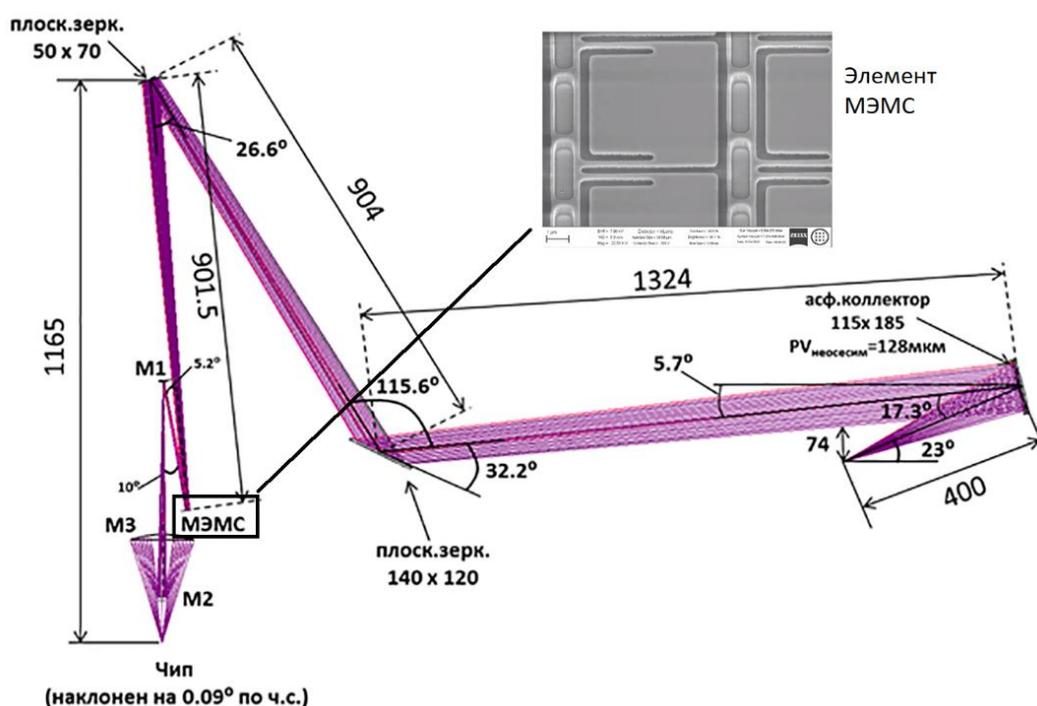


Рис.1. Рентгенооптическая схема безмасочного нанолитографа с трехзеркальным объективом (зеркала M1, M2, M3) с уменьшением 400 крат и матрицей МЭМС микрозеркал, работающей на отражение. Увеличено показан отдельный элемент МЭМС (СЭМ снимок).

Авторы: Н.И. Чхало (chkhalo@ipmras.ru), Н.Н. Салашенко, И.В. Малышев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, М.Н. Торопов (ИФМ РАН), ООО «Маппер», Институт спектроскопии РАН, МИЭТ.

Публикации:

1. N.I. Chkhalo et al., Proc. of SPIE, V.10224, 1022410-1-O8 (2016).
2. N. Chkhalo et al., Journal of Vacuum Science & Technology B, 35, 062002 (2017).
3. Н.Н. Салашенко и др., Поверхность, № 10, с.10–20 (2018).

ПФНИ: 1.3.2.5. Физика nano- и гетероструктур, мезоскопика

Работа выполнена в рамках СЧ НИР по теме «Разработка облика и критических технологий создания элементов установки безмасочной рентгеновской литографии» Государственного контракта с Министерством промышленности и торговли Российской Федерации № 21411.1970690019.11.002.

9. Динамика взаимодействующих вихрей вблизи краевого дефекта в сверхпроводнике

Впервые теоретически и экспериментально рассмотрена динамика счетного числа вихрей вблизи одиночного краевого дефекта (разреза) в узкой сверхпроводящей пленке. Обнаружено образование упорядоченного веера вихрей и поперечного ('холловского') напряжения, обусловленных взаимным отталкиванием вихрей. При приложении поперечного магнитного поля преимущественное зарождение вихрей на разрезе приводит к невзаимному, диодному, эффекту протекания тока в сверхпроводящей пленке. Полученные оценки скорости движения вихрей свыше 1 км/с позволяют использовать этот эффект для реализации сверхпроводящего диода гигагерцового диапазона частот.

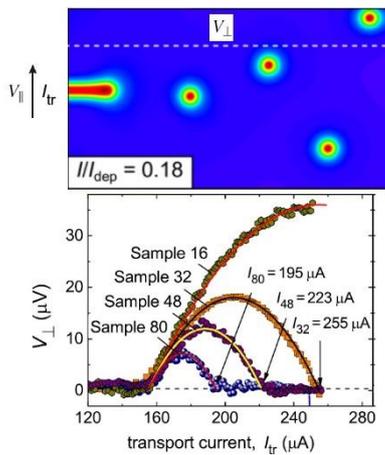


Рис. 1 Вихревой веер.

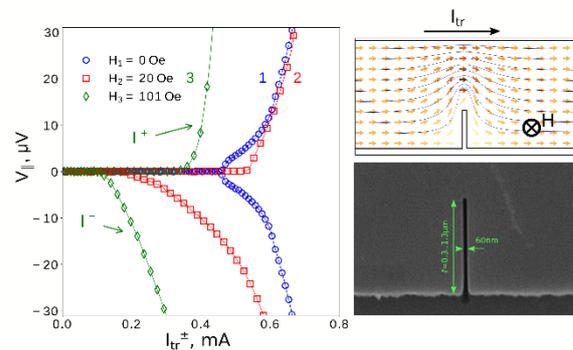


Рис. 2 Диодный эффект.

Авторы:

С.С.Уставщиков, М.Ю. Левичев, И.Ю. Пашенькин, Н.С. Гусев, С.А.Гусев, Д.Ю.Водолазов (vodolazov@ipmras.ru, +79030552964) (ИФМ РАН, Нижний Новгород, Россия);

A. I. Bezuglyj , V. A. Shklovskij (Institute for Theoretical Physics; Physics Department, V. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine);

M. Yu. Mikhailov (B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine);

B. Budinská , B. Aichner , V. M. Bevez, W. Lang, O. V. Dobrovolskiy (University of Vienna, Faculty of Physics, Vienna, Austria);

Публикации:

1) A. I. Bezuglyj , V. A. Shklovskij, B. Budinská , B. Aichner , V. M. Bevez, M. Yu. Mikhailov, D. Yu. Vodolazov, W. Lang, and O. V. Dobrovolskiy, Vortex jets generated by edge defects in current-carrying superconductor thin strips, Phys. Rev. B 105, 214507 (2022) (Editor's Suggestion, Featured in Physics).

2) Уставщиков С.С., Левичев М.Ю., Пашенькин И.Ю., Гусев Н.С., Гусев С.А., Водолазов Д.Ю., Диодный эффект в сверхпроводящей гибридной полоске Cu/MoN с боковым разрезом, ЖЭТФ, т.162, н.2, стр.262 (2022).

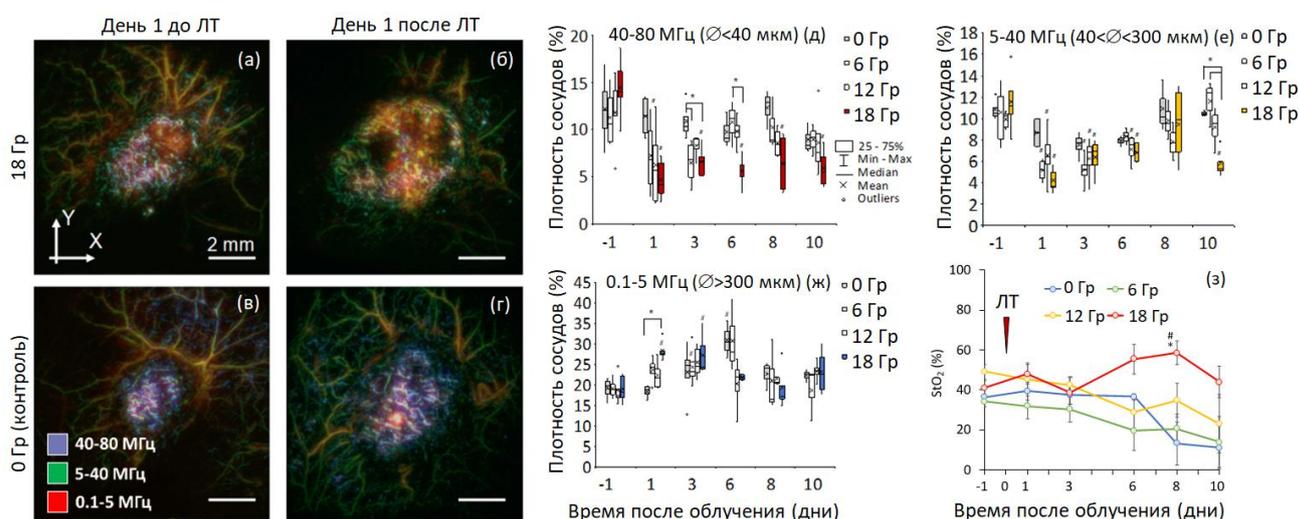
ПФНИ: 1.3.2.8. Квантовая макрофизика, Бозе-конденсаты, сверхпроводимость.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФМ РАН, тема № 0030-2021-0020.

10. Оптоакустическая ангиография и оптическая диффузионная спектроскопия для экспериментальной онкологии

Авторы: Орлова А.Г., Ахмеджанова К.Г., Курников А.А., Глявина А.М., Перекатова В.В., Хиллов А.В., Ковальчук А.В., Казаков В.В., Турчин И.В., Субочев П.В. (ИПФ РАН); Масленникова А.В., Скамницкий Д.В. (ГБУЗ НО «НОКОД»); Хоченков Д.А., Хоченкова Ю.А. (НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина, Москва); Рязанский Д.А. (ETH Zurich, Швейцария)

Уникальные возможности разработанных в ИПФ РАН экспериментальных установок для оптоакустической (ОА) ангиографии и оптической диффузионной спектроскопии (ОДС) позволили дать прижизненную оценку структуры сосудистой сети экспериментальных опухолей – плотность и сегментацию сосудов, а также оценить степень оксигенации опухоли в динамике. В экспериментах по оценке реакции опухоли на лучевое воздействие впервые показано снижение плотности и повышение фрагментации мелких сосудов (<300 мкм), в то время как для крупных сосудов выявлена обратная реакция. Длительность сосудистого ответа возрастает с повышением дозы облучения, при этом радиационно-индуцированная реоксигенация выявлена только при высокой дозе облучения и происходит несмотря на неполное восстановление повреждений сосудов.



Пример ОА изображений сосудистой сети (а)-(г); динамика плотности сосудов различного диаметра опухоли СТ26 до и после лучевой терапии (ЛТ) (д)-(ж); динамика насыщения крови кислородом (StO₂) (з).

Публикации:

- Orlova A., Pavlova K., Kurnikov A., Maslennikova A., Myagcheva M., Zakharov E., Skamnitskiy D., Perekatova V., Khilov A., Kovalchuk A., Moiseev A., Turchin I., Razansky D., Subochev P., Noninvasive optoacoustic microangiography reveals dose and size dependency of radiation-induced deep tumor vasculature remodeling. *Neoplasia*, 26, p. 100778 (2022).
- Akhmedzhanova K.G., Kurnikov A.A., Khochenkov D.A., Khochenkova Yu.A., Glyavina A.M., Kazakov V.V., Yudintsev A.V., Maslennikova A.V., Turchin I.V., Subochev P.V., Orlova A.G., In vivo monitoring of vascularization and oxygenation of tumor xenografts using optoacoustic microscopy and diffuse optical spectroscopy. *Biomedical Optics Express*, 13, p.5695-5708 (2022).

Финансирование: Грант РФФ «Разработка технологий динамического неинвазивного исследования сосудистой сети опухолей на основе оптических и оптоакустических методов», проект № 21-15-00032

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