

# 1. Отделение физики плазмы и электроники больших мощностей

**1.1.** Создана первая в России экспериментальная установка по лазерному охлаждению атомного газа до температуры квантового вырождения. Впервые приготовлен двумерный ферми-газ атомов. В эксперименте атомы изотопа лития-6 при температуре 18 нК захвачены в оптическом дипольном потенциале дископодобной формы и могут двигаться только в плоскости диска. Эта двумерная ферми-система представляет интерес для моделирования и поиска новых фундаментальных явлений физики конденсированных сред, включая фазовые переходы и критические точки. В сравнении с другими ферми-системами, атомный газ обладает уникальным набором свойств: система является принципиально беспримесной, а её параметры, включая плотность, температуру, спиновый состав, силу межчастичных взаимодействий и внешний потенциал, контролируемо перестраиваются в широких пределах.

**Авторы:** К. А. Мартьянов, В. Б. Махалов, А. В. Турлапов

**Аннотация:** Эксперименты с ультрахолодным газом атомов вызывают интерес далеко за пределами атомной физики. Опыты с газом атомов-фермионов позволяют наблюдать фундаментальные явления квантовой физики и моделировать другие ферми-системы – материю нейтронных звёзд, высокотемпературные сверхпроводники, кварк-глюонную плазму, существовавшую в первые мгновения Большого взрыва, а сейчас получаемую в ускорителях при столкновении тяжёлых ядер. Несмотря на разные пространственные и энергетические масштабы, перечисленные системы могут рассматриваться с точки зрения общих теоретических моделей. Например, наблюдавшийся сверхтекучий поток ферми-газа сходен с высокотемпературной сверхпроводимостью, поскольку существует при температурах, сравнимых с энергией Ферми. А большая энергия межчастичного взаимодействия в атомном газе (опять же, сравнимая с энергией Ферми) делает его похожим на ядерную материю нейтронной звезды.

Атомный ферми-газ – чрезвычайно удобная среда для количественной проверки фундаментальных теорий и наблюдения новых явлений, поскольку основные параметры системы контролируемы и могут перестраиваться в широких пределах. К таким параметрам относится межчастичное взаимодействие, спиновый состав и создаваемый оптическими полями внешний потенциал (например, периодический, моделирующий кристаллическую решётку твёрдого тела).

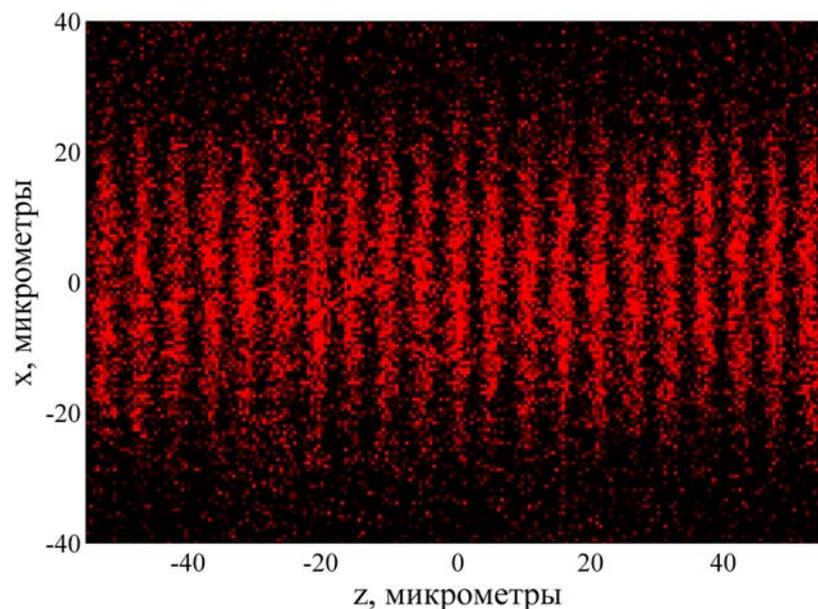
Двумерный ферми-газа атомов интересен в первую очередь для будущего изучения фазовых переходов и критических точек, поскольку пространственная размерность существенно влияет на физику фазовых переходов. Возможно, эта система позволит количественно проверять теории высокотемпературной сверхпроводимости, поскольку современные высокотемпературные сверхпроводники являются 2-мерными системами.

Сообщение о приготовлении в ИПФ РАН 2-мерного газа вызвало широкий интерес – журнал *Science* опубликовал репортаж [*Science* 329, 492 (2010)], а оригинальная статья в *Physical Review Letters* вышла под грифом «Редактор рекомендует». В эксперименте наблюдалась серия изолированных облаков дископодобной формы (см. Рис. 1), каждое из которых представляет собой двумерную атомную систему с температурой в 10 меньше энергии Ферми, то есть в состоянии глубокого квантового вырождения.

## Публикации

1. К.А.Мартьянов, В.Б.Махалов, А.В.Турлапов, Наблюдение вырожденного ферми-газа, пленённого стоячей электромагнитной волной, *Письма в ЖЭТФ* **91**, 401 (2010).

2. K.Martiyanov, V.Makhalov, and A.Turlapov, Observation of a two-dimensional Fermi gas of atoms, *Physical Review Letters* **105**, 030404 (2010).



**Рисунок 1.** Снимок серии облаков 2-мерного газа (показаны красным). Снимок сделан вдоль 2-мерных поверхностей. Каждая красная полоса – изолированная двумерная система из 1400 атомов в двух спиновых состояниях.



**Рисунок 2.** Фрагмент установки для лазерного пленения и охлаждения атомного газа

**1.2.** В испытаниях образца мегаваттного непрерывного 170 ГГц гиротрона для ИТЭР продемонстрированы требуемые мощностные параметры гиротрона (1МВт/500 сек/50%КПД): получена мощность 1.05 МВт в импульсах до 500 секунд и 0.8 МВт в импульсах до 1000 секунд при КПД 53-55%.

**Авторы:** А. Г. Литвак, Г. Г. Денисов, В. Е. Запезалов, А. В. Чирков, А. Н. Куфтин, В. И. Малыгин, В. В. Паршин, Е. В. Соколов, В. Г. Усов совместно с ЗАО НПП «ГИКОМ» и ИЯС РНЦ «Курчатовский Институт»

**Аннотация:** При участии в проекте ИТЭР Россия \_поставляет, в частности, 30% гиротронов электронно-циклотронной системы установки \_восемь гиротронных систем, каждая из которых состоит из гиротрона, сверхпроводящего магнита, согласующей СВЧ оптики, вспомогательных источников питания, магнитных катушек и блока управления.

В российском прототипе гиротрона для ИТЭР в качестве рабочей волны используется мода  $TE_{25,10}$  сверхразмерного резонатора, что позволяет обеспечить необходимое охлаждение стенок резонатора в режиме непрерывной генерации мегаваттной мощности. Гиротрон оснащен системой рекуперации остаточной энергии электронного пучка, что повышает КПД прибора с 34% до 53% и примерно вдвое уменьшает тепловую нагрузку на коллектор. Гиротрон оснащен барьерным окном выполненным из искусственного алмазного диска.

Основные испытания гиротрона выполнены на стенде Курчатовского института. Стенд оснащен вакуумной линией передачи и нагрузкой для СВЧ излучения. Гиротрон испытан как в заливном российском криомагните, так и в «сухом» (без жидкого гелия) магните производства США (см. рис. 1).

В испытаниях образца мегаваттного непрерывного 170 ГГц гиротрона для ИТЭР продемонстрированы требуемые мощностные параметры гиротрона (1МВт/500 сек/50%КПД): получена мощность 1.05 МВт в импульсах до 500 секунд и 0.8 МВт в импульсах до 1000 секунд при КПД 53-55%.

### Публикации

1. A.G.Litvak, Recent Results of Development in Russia of 170 GHz Gyrotron for ITER. Proceedings of the 35<sup>th</sup> International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Rome, 2010, Tu-E1.1.

2. A.G.Litvak, G.G.Denisov, V.E.Myasnikov, E.M.Tai, E.A.Azizov, V.I.Ilin.

Development in Russia of Megawatt Power Gyrotrons for Fusion. International Journal on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (принята в печать).



(a)



(б)

**Рисунок 1.** Прототипы гиротрона для ИТЭР: (а) гиротрон V-9 с воздушным охлаждением рекуперационного изолятора, испытанный в 2009 году заливном криомагните производства НПП ГИКОМ, (б) гиротрон V-10 с жидкостным охлаждением рекуперационного изолятора, испытанный в 2010 в криомагните производства CRYOMAGNETICS Inc.

**1.3.** Впервые разработан и изготовлен лабораторный образец спектрометрического комплекса для пассивного термического зондирования средней атмосферы с поверхности Земли, позволяющий на основе измеренных спектров собственного излучения атмосферы вблизи края 6-ти миллиметровой полосы поглощения молекулярного кислорода (диапазон частот 52,4–53,2 ГГц) восстанавливать вертикальное распределение температуры в стратосфере и верхней тропосфере. Комплекс включает в себя спектрометр, оснащенный уникальной системой внутренней (без использования внешних эталонов) калибровки, и пакет программ, реализующий новый алгоритм восстановления профиля температуры. Комплекс мобилен (весит менее 20 кг), обеспечивает возможность круглосуточной и практически всепогодной работы в автоматическом режиме и позволяет измерять температуру с относительной погрешностью менее 0,05 (95% доверительный интервал) в интервале высот от 10 до 55 км. На высотах 15-40 км относительная погрешность составляет менее 0,01.

**Авторы:** А.А. Швецов, Л.И. Федосеев, Д.А. Караштин, О.С. Большаков, Д.Н. Мухин, Н.К. Скалыга, А.М. Фейгин.

**Аннотация:** Впервые в мире создан микроволновый спектрометрический комплекс пассивного термического зондирования средней атмосферы с поверхности Земли. Комплекс включает в себя спектрометр, осуществляющий прием и спектральный анализ теплового излучения атмосферы в слабых линиях молекулярного кислорода, с квантовыми числами 29<sub>1</sub> и 27<sub>1</sub>, лежащих на низкочастотном склоне 5-ти миллиметровой полосы и разрешаемых с уровня моря, а также алгоритм и программный код для сбора, обработки результатов измерений и решения обратной задачи восстановления вертикального профиля температуры по данным наземного зондирования.

Спектрометр снабжен уникальной системой внутренней калибровки, позволяющей обходиться без внешних эталонов. Высокая флуктуационная чувствительность прибора обеспечивается входным усилителем на НЕМТ транзисторах. Шумовая температура спектрометра не более 1400 К. Цифровой анализатор спектра быстрого преобразования Фурье производит анализ сигнала на промежуточной частоте в широкой полосе около 1 ГГц с частотным разрешением 61 КГц. Управление прибором, сбор данных, и их обработка осуществляются с помощью персонального компьютера.

Для восстановления вертикального распределения температуры на основе измеренных спектров используется созданный в ИПФ РАН оригинальный метод решения обратной некорректной задачи и пакет соответствующих программ для ПК.

Комплекс мобилен (весит менее 20 кг), обеспечивает возможность круглосуточной и практически всепогодной работы в автоматическом режиме и позволяет измерять температуру с относительной погрешностью менее 0,05 (95% доверительный интервал) в интервале высот от 10 до 55 км за время накопления порядка 1 часа. На высотах 15-40 км относительная погрешность составляет менее 0,01.

Комплекс был успешно апробирован в первых наземных измерениях термической структуры атмосферы.

## Публикации

1. А.А. Швецов, Л.И. Федосеев, Д.А. Караштин, О.С. Большаков, Д.Н. Мухин, Н.К. Скалыга, А.М. Фейгин, *Измерение профиля температуры средней атмосферы с помощью наземного спектрорадиометрического комплекса*, Известия ВУЗов – Радиофизика. Том 53, вып.5-6, 2010.

2. Shvetsov et al., Complex for ground-based thermal sounding of atmosphere: setup description, results of first observation, URSI Commission F Microwave Signatures 2010: Specialist Symposium on Microwave Remote Sensing of the Earth, Oceans, and Atmosphere. Florence, Italy, 4-8 October 2010.

3. Feigin et al., *Ground based thermosounding of atmosphere: Retrieval procedure*, URSI Commission F Microwave Signatures 2010: Specialist Symposium on Microwave Remote Sensing of the Earth, Oceans, and Atmosphere. Florence, Italy, 4-8 October 2010.

1.4. Разработана технология эпитаксиального роста монокристаллического CVD алмаза на подложках из природного алмаза IIa типа. Синтезированы монокристаллические слои CVD алмаза с качеством, превышающим качество подложки, ориентации (100) и толщиной от 100 до 300 микрон. На основе выращенного CVD алмаза получен полупроводниковый алмаз р-типа с рекордной подвижностью дырок равной  $1150 \text{ cm}^2/\text{V s}$ , наибольшей из получаемых в полупроводниковом алмазе при легировании бором методом ионной имплантации. Созданный приповерхностный высоколегированный слой р-типа позволяет использовать его в качестве приконтактного слоя в электронных приборах.

**Авторы:** А. Л. Вихарев, А. М. Горбачев, А. Б. Мучников, Д. Б. Радищев (ИПФ РАН), М. П. Духновский, В. Е. Земляков, А. К. Ратникова, Ю. Ю. Федоров (ФГУП «НИИ «ИСТОК», Фрязино), А. А. Алтухов, К. Н. Зяблук, А. В. Митенкин (ПТЦ «УралАлмазИнвест», Москва)

**Аннотация:** В плазмохимическом реакторе на основе объемного резонатора с СВЧ разрядом, поддерживаемым излучением на частоте 2,45 ГГц, найдены условия, при которых происходит осаждение монокристаллических алмазных слоев высокого качества. На монокристаллических подложках из природного алмаза типа IIa синтезированы монокристаллические слои CVD алмаза с качеством превышающим качество подложки, ориентации (100), толщиной от 100 до 350 мкм. Полупроводниковый CVD алмаз получен при легировании слоев бором методом ионной имплантации. Найден оптимальный режим восстановления алмаза после имплантации путем отжига. При уровне легирования ионами бора  $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  получены качественные слои р-типа с рекордной подвижностью дырок равной  $1150 \text{ cm}^2/\text{V s}$ , наибольшей из получаемых в полупроводниковом алмазе с ионной имплантацией. Созданный приповерхностный высоколегированный слой р-типа позволяет использовать его в качестве приконтактного слоя в электронных приборах.

## Публикации

1. А.А. Алтухов, А.Л. Вихарев, А.М. Горбачев, М.П. Духновский, В.Е. Земляков, К.Н. Зяблук, А.В. Митенкин, А.Б. Мучников, Д.Б. Радищев, А.К. Ратникова, Ю.Ю.Федоров, «Исследование свойств монокристаллического алмаза, выращенного из газовой фазы на подложках из природного алмаза», Физика и техника полупроводников, 2011, т.45, №3 (в печати).

2. A.K.Ratnikova, M.P.Dukhnovsky, Yu.Yu.Fedorod, V.E.Zemlyakov, A.B.Muchnikov, A.L.Vikharev, A.M.Gorbachev, D.B.Radishev, A.A.Altukhov, A.V.Mitenkin, Homoepitaxial single crystal diamond grown on natural diamond seeds (type IIa) with boron-implanted layer demonstrating the highest mobility of  $1150 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  at  $300^{\circ}\text{K}$  for ion-implanted diamond, Proc.

1.5. Развита новый метод получения мультигигаваттного уровня пиковой мощности микроволнового излучения за счет пассивной компрессии частотно-модулированных (ЧМ) импульсов в диспергирующих средах (ДС). В качестве ДС использован волновод с винтовой гофрировкой поверхности, а в качестве источника ЧМ импульса – релятивистская ЛОВ 3-см диапазона со сравнительно низким и спадающим в течение импульса ускоряющим напряжением. Продемонстрирована компрессия импульса до длительности 2.2 нс, сопровождавшаяся увеличением пиковой мощности до 3.2 ГВт (в 4.5 раза).

**Авторы:** В.Л. Братман, Г.Г. Денисов, Н.Г. Колганов, С.В. Мишакин, С.В. Самсонов, Д.И. Соболев

**Аннотация.** Одной из актуальных задач вакуумной электроники является создание СВЧ источников гигаваттной и мультигигаваттной импульсной мощности. Уровень мощности до 15 ГВт на длине волны 3 см был зарегистрирован более 20 лет назад в эксперименте, проведенном на уникальном сильноточном ускорителе электронов с высокой энергией частиц до 2 МэВ. Достижение мощности такого уровня при меньшей энергии частиц могло бы значительно повысить привлекательность подобных генераторов и расширить круг их приложений. Поэтому в ряде работ разрабатываются мощные СВЧ источники с существенно меньшей энергией частиц - до 600 кэВ. Подобные пучки с током до 5-10 кА и длительностью импульсов до 20-40 нс могут быть получены на сравнительно компактных и доступных для лабораторных исследований высоковольтных установках. На использовании подобных пучков основаны, в частности, активно развивающиеся генераторы, в которых за счет эффектов сверхизлучения пиковое значение выходной мощности может существенно превышать мощность электронного пучка. В представляемом результате исследован более гибкий альтернативный метод, основанный на генерации импульсов с плавно изменяющейся частотой и последующей их компрессии в диспергирующей линейной среде.

Коэффициент компрессии по мощности для частотно-модулированного импульса при малых потерях примерно равен произведению длительности входного импульса на интервал частотной модуляции. В 3-см диапазоне импульс длительностью 20-40 нс с модуляцией частоты в реалистической полосе 5% может быть сжат по длительности и соответственно увеличен по мощности в 10-20 раз. При этом для получения мультигигаваттной выходной мощности в качестве источника частотно-модулированных (ЧМ) импульсов может быть использован релятивистский электронный СВЧ генератор или усилитель с мощностью в несколько сотен мегаватт. Наиболее освоенными источниками такого уровня мощности в настоящее время являются релятивистские лампы обратной волны (ЛОВ). Хорошо известно, что в маломощных слабoreлятивистских ЛОВ частота излучения плавно и быстро изменяется в широких пределах при плавном изменении напряжения. Это свойство частично сохраняется и при умеренно релятивистских энергиях электронов, что позволяет плавно изменять частоту генерации в течение наносекундного импульса за счет изменения ускоряющего напряжения. Для компрессии таких модулированных по частоте мощных СВЧ импульсов наиболее удобен предложенный авторами круглый металлический волновод с винтовой гофрировкой внутренней поверхности. При оптимальном выборе параметров гофрировки волновода групповая скорость одной из его нормальных волн обладает сильной зависимостью от частоты, что является необходимым условием для компрессии.

## Публикации

1. S. V. Samsonov, A. D. R. Phelps, G. Burt, V.L. Bratman, G. G. Denisov, A. W. Cross, K. Ronald, W. He, and H. Yin. Compression of Frequency-Modulated Pulses using Helically Corrugated Wave-guides and Its Potential for Generating Multigigawatt rf Radiation// Phys. Rev. Lett., 2004, p. 118301.

2. В.Л. Братман, Г.Г. Денисов, С.В. Самсонов, А.У. Кросс, К. Рональд, А.Д.Р. Фелпс. Метод достижения мультигигаваттной пиковой мощности путем компрессии СВЧ импульсов релятивистской ЛОВ в винтовом волноводе// Известия ВУЗов. Радиофизика, 2007, Т.50, 1, с.40-53.

3. М.Бечаснов, В.Л.Братман, Н.Г.Колганов, С.В.Мишакин, С.В.Самсонов. Релятивистская ЛОВ с перестройкой частоты напряжением // ПЖТФ, 2010, с. 96-103.

4. В.Л. Братман, Г.Г. Денисов, Н.Г. Колганов, С.В. Мишакин, С.В. Самсонов, Д.И. Соболев. Микроволновый источник мультигигаваттной пиковой мощности на основе комбинации релятивистской ЛОВ и компрессора // ЖТФ, 2011, с. 113-117.

5. V. L. Bratman, G. G. Denisov, N.G. Kolganov, S. V. Mishakin, S. V. Samsonov, A. W. Cross, W. He, L. Zhang, M. McStravick, C. G. Whyte, A. R. Young, K. Ronald, C. W. Robertson, and A. D. R. Phelps. Generation of 3 GW microwave pulses in X-band from a combination of a relativistic backward-wave oscillator and a helical-waveguide compressor//Physics of Plasmas, 2010, 17, 110703.

1.6. На стенде, состоящем из двух сильноточных ускорителей РАДАН, синхронизованных с пикосекундной точностью, впервые наблюдался эффект нелинейной компрессии импульсов микроволнового сверхизлучения в процессе их усиления квазистационарным электронным потоком. В соответствии с результатами теоретического анализа, в волноводе, частично заполненном диэлектриком, 4-х кратное усиление импульсов 8-мм диапазона до уровня мощности 200 МВт сопровождалось трехкратным укорочением их эффективной длительности. Таким способом получены микроволновые импульсы рекордно короткой длительности, не превышающей 100 пс.

**Авторы:** М.И.Яландин, А.Г.Реутова, М.Р.Ульмаскулов, К.А.Шарыпов, С.А.Шунайлов (Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург), Н.С.Гинзбург, И.В.Зотова, Е.Р.Кочаровская, А.С.Сергеев (Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород)

**Аннотация.** Впервые экспериментально наблюдался эффект нелинейной компрессии микроволновых импульсов сверхизлучения в процессе усиления квазистационарными электронными потоками. Указанный эффект реализуется в условиях, когда групповая скорость излучения отлична от поступательной скорости электронов. В этом случае входной электромагнитный импульс, смещаясь по электронному потоку, взаимодействует с электронными фракциями, не имеющими (с точностью до шумовой компоненты) модуляции по скорости и плотности частиц, и последовательно отбирает у них энергию. Соответственно, рост пиковой мощности входного импульса не ограничивается типичными для электронных усилителей механизмами захвата частиц волной и в оптимальных условиях пиковая мощность выходного сигнала может превышать мощность электронного пучка. Одновременно имеет место сокращение эффективной длительности импульса [Н.С.Гинзбург, И.В.Зотова, А.С.Сергеев, Письма в ЖТФ **25**(20), 25 (1999), В.Р.Барышев, Н.С.Гинзбург, И.В.Зотова, А.С.Сергеев, М.Р.Розенталь, М.И.Яландин, ЖТФ **79**(1), 105 (2009)].

Эксперимент по наблюдению эффекта нелинейной компрессии импульсов сверхизлучения проведен на установке, состоящей из двух синхронизованных с пикосекундной точностью сильноточных ускорителей РАДАН [М.И.Яландин, В.Г.Шпак, ПТЭ 3, 5 (2001)]. Первый из них запитывал источник 37 ГГц импульсов сверхизлучения с длительностью ~300 пс. Второй ускоритель с током пучка до 1.2 кА и энергией электронов ~300 кэВ использовался в усилительной секции в виде волновода, частично заполненного диэлектриком В соответствии с результатами теоретического анализа 4-х кратное усиление электромагнитных импульсов до уровня мощности 200 МВт сопровождалось значительным (не менее чем трехкратным) укорочением их эффективной длительности. В результате проведенных исследований в 8-мм диапазоне получены микроволновые импульсы рекордно короткой длительности не превышающей 100 пс [М.И.Яландин, А.Г.Реутова, М.Р.Ульмаскулов, К.А.Шарыпов, С.А.Шунайлов, Н.С.Гинзбург, И.В.Зотова, Е.Р.Кочаровская, А.С.Сергеев, Письма в ЖЭТФ, 2010, том.91, вып.11, с.620-625].

### Публикации

1. Письма в ЖЭТФ, 2010, том.91, вып.11, с.620-625

1.7. Реализован способ микроволнового воспламенения метательного заряда артиллерийского орудия с безгильзовым заряданием. Проведенные в реальных условиях испытания микроволновой системы инициации с длиной волны 12 см, установленной на самоходной артиллерийской установке калибра 152мм, показали высокую надёжность и простоту в управлении. Предложенный способ открывает широкие перспективы в создании новых видов ствольной артиллерии с системой безгильзового зарядания.

**Авторы:** Бродский Ю.Я., Голубев С.В., Ковалёв Н.Ф., Перминов А.О. (ИПФ РАН), Беляев В.А., Закаменных Г.И., Соловьёв В.Е., Чернов В.В. (ОАО ЦНИИ «Буревестник»)

**Аннотация.** В настоящее время одним из направлений повышения эффективности крупнокалиберных артиллерийских установок является применение модульных метательных зарядов (ММЗ) в жестких сгорающих картузах. Пороховой заряд в виде отдельных модулей помещается в камеру орудия в количестве, определяемом режимом стрельбы. В зависимости от дальности стрельбы, в самоходной артиллерийской установке (САУ) может быть помещено от одного до шести модулей, которые в камере могут располагаться произвольным образом. При этом возникает серьёзная проблема инициации воспламенения модулей при выстреле.

Традиционно используемые способы воспламенения выполнены с использованием капсюлей, запальных трубок, ударных трубок и капсюльных втулок. Такие средства воспламенения представляют собой конструктивно обособленный элемент выстрела, который размещается в специальной камере затвора с дополнительными элементами обтюрации и автоматом зарядания. Воспламенение при этом, как правило, является многостадийным процессом, включающим четыре этапа:

- воспламенение иницирующего взрывчатого вещества путем удара по капсюлю или протекания тока в цепи воспламенения;
- передача воспламенения к пороховой петарде средства воспламенения, усиливающей импульс воспламенения;
- передача воспламенения от пороховой петарды к воспламенителю метательного заряда (МЗ), обеспечивающего форс пламени, способный воспламенить порох МЗ;
- зажжение пороха МЗ вблизи воспламенителя и распространение фронта воспламенения по МЗ до его полного воспламенения.

Такая многоэтапность усложняет конструкции, снижает надежность, приводит к нестабильности воспламенения и удорожанию выстрела, уменьшает скорострельность, исключает многократность использования элементов воспламенения. Осечка приводит к остановке стрельбы, что сказывается на боевой эффективности орудия.

Технологически наиболее простым способом инициации возгорания пороха является прямой нагрев его электромагнитным излучением любого вида. Однако, элементарные оценки показывают, что мощность, необходимая для нагрева пороха в одном модуле объемом 20 л за 0,1 с до температуры возгорания, равной  $300^{\circ}\text{C}$ , составляет более 300 МВт. Формирование соответствующих импульсов излучения, охватывающего весь объем модуля, является в условиях боевого артиллерийского комплекса задачей неразрешимой. Задача существенно упрощается, если сконцентрировать энергию излучения в малом объеме, определяемом возможностями реальных источников излучения. В частности, если импульсная мощность излучения равна 1 кВт, то в течение 0,1 с можно нагреть до температуры воспламенения объем пороха, равный  $0,1\text{ см}^3$ . Таким образом, если мы найдём способ концентрации энергии излучения в малом объеме, то задача, в принципе, может быть решена.

В методе, разработанном в ИПФ совместно с ЗАО «Буревестник», в качестве концентратора энергии излучения используется пассивная резонансная антенна, совмещённая со специально разработанным инициатором, энергия инициации которого составляет 0,4 мДж. Иницирующий элемент размещается в модуле и при этом иницирующие свойства не зависят от места расположения модуля в камере. Данное устройство было установлено на макете САУ и испытано в полевых условиях.

#### **Публикации**

1. Патент на изобретение № 2348004 «способ воспламенения метательного заряда в камере ствола артиллерийского орудия с безгильзовым заряданием и устройство для его осуществления», Заявка № 2007101475, Приоритет 17.01.2007, Зарегистрирован 27.02.2009, Срок действия 17.01.1027.



1.8. Разработан программный комплекс для численного моделирования динамики одиночных квантовых систем, ансамблей квантовых систем и элементов приборов на их основе в реальных условиях взаимодействия с шумовым резервуаром методом квантовых траекторий (квантовым методом Монте-Карло), поддерживающий суперкомпьютерные технологии. Использование комплекса позволило интерпретировать результаты недавних экспериментов по распространению квантованного поля в среде атомов в режиме электромагнитно-индуцированной прозрачности, а также исследованию диссипативной динамики и томографии состояния одиночного кубита (квантового бита) на основе джозефсоновских переходов.

**Авторы:** А.И.Гельман, В.А.Миронов (ИПФ РАН), А.М.Сатанин (ННГУ)

**Аннотация.** Релаксационные процессы играют ключевую роль во многих приборах квантовой оптики и становятся определяющими в работе современных нанoeлектронных устройств, таких как полупроводниковые нанотранзисторы и процессоры на их основе, сверхпроводящие СКВИДы, устройства молекулярной электроники и т.п. Например, в транзисторах Intel размер рабочего канала составляют всего несколько нанометров, и должен скоро достигнуть атомных.

Проблема релаксации особенно существенна при реализации квантовых компьютеров, систем обработки и хранения квантовой информации, квантовой криптографии. Это направление исследований стало актуальным в последнее время, что подтверждается «дорожными картами» (roadmap), недавно опубликованными и действующими в США и Европе (апрель 2010 г., [www.qiurope.net](http://www.qiurope.net)). В настоящее время созданы коммерческие образцы приборов, реализующих алгоритм квантовой криптографии, активно ведутся эксперименты с технической реализацией квантовых битов (кубитов) – логических элементов квантового компьютера.

При этом важнейшей задачей становится численное моделирование работы современных квантовых устройств в реальных условиях взаимодействия с внешней средой с целью интерпретации существующих и прогнозирования новых экспериментов. Данная возможность была реализована нами в программном комплексе «КУБИТ» на основе квантового метода Монте-Карло расчета диссипативной динамики многоуровневых квантовых систем, предложенного в 1993 г. Новизна нашего подхода в эффективном распараллеливании алгоритма и использовании мощностей современных суперкомпьютеров, что позволяет рассчитывать реальные устройства за разумное время. Программа позволяет моделировать работу генератора одиночных фотонов, прецизионных спектроскопов, полупроводниковых транзисторов и генераторов на квантовых точках, сверхпроводящих квантовых битов (логические элементы квантового компьютера), алгоритма квантовой криптографии, квантового компьютера (до 100 кубитов) и др.

В рамках данной задачи нами рассмотрена возможность переноса статистики квантованного поля на среду с целью подавления квантовых флуктуаций в атоме и уменьшения дисперсии операторов, отвечающих за поляризацию на низкочастотном атомном переходе, предназначенном для хранения квантовой информации, что активно исследуется в последнее время. Также изучены кубиты на основе сверхпроводящих элементов (джозефсоновских переходов), как наиболее перспективные для реализации квантового компьютера.

### Публикации

1. А.И.Гельман, В.А.Миронов. Численное моделирование квантовой релаксации в многоуровневых атомных системах методом Монте-Карло: препринт №773; ИПФ РАН. – Н. Новгород, 2008. – 42 с.

2. A.Gelman, V.Mironov. Noise suppression in three-level atomic system driven by quantized field. Proc. SPIE. 2009. V. 7521. P. 75210F.

3. А.И. Гельман, В.А. Миронов. Подавление шума в атомной системе под действием поля в сжатом когерентном состоянии. ЖЭТФ. 2010. Т. 137. С. 627-636.

4. А. И. Гельман, А. М. Сатанин. Релаксационная динамика сверхпроводящих джозефсоновских кубитов в сильном переменном поле. ФТТ. 2010. Т. 52. С. 2094-2099.

5. А. И. Гельман, А. М. Сатанин. Квантовые скачки при переходах Ландау-Зинера в диссипативной динамике сверхпроводящего кубита. Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. С. 584-589.

6. А.И. Гельман, В.А. Миронов. Особенности диссипативной динамики  $\Lambda$ -атома под действием квантованного поля в сжатом состоянии. Учен. зап. Казан. Ун-та. Сер. Физ.-матем. Науки. 2010. Т. 152, кн. 2.

7. А. И. Гельман, А. М. Сатанин. Квантовые скачки при спонтанной релаксации сверхпроводящего кубита под действием сильного ВЧ поля. Вестник ННГУ. 2010. №5 (2), с. 54-57.

8. А. И. Гельман, М. В. Денисенко, А. М. Сатанин Динамический контроль квантовых состояний джозефсоновских кубитов. Вестник ННГУ. 2010. (принято к печати)

1.9. Предложен механизм бесстолкновительного нагрева ионов в ионизационных процессах при амбиполярном расширении плазмы в вакуум. Формирование разброса ионов по энергиям в этом случае обусловлено пространственной неоднородностью амбиполярного потенциала плазмы в области протекания ионизационных процессов. Разработана самосогласованная количественная модель этого процесса для ЭЦР источников многозарядных ионов, позволяющая объяснить наблюдающуюся в экспериментах угловую расходимость экстрагированного пучка ионов.

**Авторы:** М.А. Дорф, В.Г. Зорин, И.В. Изотов, С.В. Разин, В.Е. Семенов, А.В. Сидоров, В.А. Скалыга

**Аннотация.** Эффективность сильноточных источников многозарядных ионов в значительной степени определяется угловой расходимостью экстрагируемого пучка ионов, которая существенным образом возрастает с увеличением температуры ионов (точнее, разбросом последних по энергии). Эксперименты показывают, что в ЭЦР источниках многозарядных ионов, рассматривающихся в настоящее время как наиболее перспективные, угловая расходимость экстрагируемого ионного пучка намного превышает ту величину, которая могла бы быть обусловлена нагревом ионов в результате их столкновений с энергичными электронами в магнитной ловушке. Детальные исследования показали, что повышенный разброс ионов по энергиям обусловлен их рождением (в ионизационных процессах) в областях пространства, имеющих различную величину амбиполярного потенциала. Для теоретического анализа эффекта была предложена самосогласованная модель ЭЦР разряда в магнитной ловушке, основанная на гидродинамическом приближении. Результаты расчета разброса экстрагированного пучка ионов по энергиям в рамках этой модели показали хорошее согласие с данными эксперимента, что позволяет предлагать оптимизацию конфигурации ловушки. В частности, снижения теплового разброса в экстрагируемом пучке ионов следует ожидать при переходе к ловушке с «прямоугольным» профилем осевого магнитного поля с большим пробочным отношением. В этом случае области ионизации (основная длина ловушки) и основного ускорения ионов (в окрестности магнитной пробки) до скорости ионного звука будут разделены в пространстве.

## Публикации

1. Mikhail A. Dorf, Vladimir Semenov and Vladimir Zorin. A Fluid Model for Ion Heating due to Ionization in a Plasma Flow. *Physics of Plasmas*. **15**, 093501 (1-6 pp) (2008).

2. А.В. Сидоров, В.Г. Зорин, И.В. Изотов, С.В. Разин, В.А. Скалыга. Формирование сильнооточного пучка многозарядных ионов из плотной плазмы, создаваемой мощным миллиметровым излучением гиротрона в условиях электронного циклотронного резонанса. *Журнал технической физики*, 2010, том 80, вып. 10

1.10. На основе развитой теории пассивной синхронизации электромагнитных мод в плазменном магнитосферном мазере дано объяснение динамических спектров короткопериодических ОНЧ излучений (килогерцовый диапазон частот) с секундными периодами повторения спектральных форм, которые наблюдаются современными спутниковыми и наземными измерительными системами. Предложены новые методы диагностики величины и угловой зависимости мощности естественных источников энергичных электронов в магнитосфере Земли.

**Авторы:** П.А. Беспалов (ИПФ РАН), M. Parrot (LPCE/CNRS, France), J. Manninen (SGO, Finland)

**Аннотация.** В рамках оригинального формализма одним из авторов ранее было получено точное решение в виде распространяющегося между областями отражения электромагнитного солитона огибающей с частотным дрейфом заполнения в неоднородном плазменном мазере с неэквидистантным частотным спектром резонатора. Теория применена для плазменного магнитосферного мазера, что позволило предсказать условия существования короткопериодических ОНЧ излучений с периодами повторения спектральных форм от 2 до 7 секунд [П.А. Беспалов. Пассивная синхронизация мод в мазерах с неэквидистантным спектром. *ЖЭТФ*, 1984, т. 87, № 12, с. 1894-1904; Bepalov P.A. Effective saturation of absorption in a plasma magnetospheric maser. In book: *Nonlinear Space Plasma Physics*, R.Z.Sagdeev -Editor-in-Chief, American Institute of Physics, 1993, p.339-346]. Уровень экспериментальных данных в то время не давал возможности четко выделить такие излучения.

Развитие аналитического формализма дало возможность выразить феноменологические коэффициенты теории через конкретные характеристики электронных радиационных поясов и параметры магнитосферного резонатора. Реализованы расчеты спектров короткопериодических ОНЧ излучений. Результаты расчетов сопоставлены с высококачественными современными спутниковыми и наземными экспериментальными данными. В итоге проделанной работы четко выделены короткопериодические ОНЧ излучения и объяснены их основные свойства. Полученные результаты важны для диагностики магнитосферы, включая скрытые параметры, такие как величина и угловая зависимость мощности естественных источников энергичных электронов в области радиационных поясов.

## Публикации

P.A. Bepalov, M. Parrot, J. Manninen. Short-period VLF emissions as solitary envelope waves in a magnetospheric plasma maser. *J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2010, v. 72, p. 1275-1281.

П.А. Беспалов. Новые методы диагностики магнитосферной плазмы. *Геомагнетизм и аэрномия*, 2010 (принята к печати).

1.11. Развита теория происхождения мощного ультрафиолетового излучения, наблюдаемого на лимбе спутника Юпитера Ио вблизи его экватора. Показано, что за генерацию этого излучения отвечают электроны, нагретые в ионосфере Ио до температуры, достаточной для эффективного столкновительного возбуждения атомов кислорода и серы, которые излучают в ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Нагрев электронов обусловлен развитием в ионосфере Ио бунемановской неустойчивости, вызванной относительным движением электронов и ионов под действием электрического поля разделения зарядов в «лобовой» части спутника, причем наиболее эффективный нагрев происходит в экваториальной области его ионосферы. Показано также, что указанный механизм нагрева является источником энергии для наблюдаемого ультрафиолетового излучения спутника Сатурна Титана.

**Авторы:** В.Е. Шапошников, В.В. Зайцев

**Аннотация.** Наблюдения ультрафиолетового излучения от спутника Юпитера Ио показали, что наиболее мощное излучение сосредоточено на лимбе спутника в небольших приэкваториальных областях, получивших название «экваториальные споты». Эти источники располагаются на высоте 100-200 км над поверхностью спутника и имеют протяженность по высоте несколько сот километров. Ультрафиолетовое излучение обусловлено переходами в линиях атомов кислорода и серы в атмосфере Ио. Расчеты, проведенные в работе [Sauer, J., Neubauer, F. M., Strobel, D. F., and Summers, M. E.: Io's ultraviolet aurora: Remote sensing of Io's interaction, Geophys. Res. Lett., V. 27, pp. 2893-2896, 2000.] показали, что возбуждение атомов кислорода и серы электронами плазменного тора и ионосферы тора может обеспечить только около 5% наблюдаемого потока.

Спутник Сатурна Титан, который как Ио обладает атмосферой и ионосферой, также является источником мощного ультрафиолетового излучения. Солнечные фотоны, электроны магнитосферы Сатурна и ионосферы спутника могут обеспечить только половину энергии, необходимой для возбуждения нейтральной атмосферы (в основном молекулярного азота) Титана.

В работах мы показали, что малый вклад электронов ионосферы спутников Ио и Титана в наблюдаемое ультрафиолетовое излучение обусловлено их малой температурой. В этом случае только небольшое количество высокоэнергичных электронов «хвоста» функции распределения способно обеспечить возбуждение уровней, необходимых для генерации ультрафиолетового излучения. Мы также показали, что в ионосфере спутников реализуются условия для эффективного нагрева электронов до температуры, достаточной для эффективного столкновительного возбуждения нейтралов в атмосфере Ио и Титана, излучающих в ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Нагрев электронов обусловлен развитием в ионосфере спутников бунемановской неустойчивости, вызванной относительным движением электронов и ионов под действием электрического поля разделения зарядов в «лобовой» части спутника, причем наиболее эффективный нагрев происходит в экваториальной области его ионосферы. Ио и Титан движутся в магнитном поле своих планет. В ионосфере спутников из-за этого индуцируется электрическое поле  $\mathbf{E}_i = (1/c)[\mathbf{V} \times \mathbf{B}_0]$ , где  $\mathbf{V}$  – вектор скорости спутника относительно планетарного магнитного поля  $\mathbf{B}_0$ . Благодаря анизотропной проводимости ионосферы электрическое поле  $\mathbf{E}_i$  индуцирует педерсеновский ток вдоль  $\mathbf{E}_i$  и стремится создать холловский ток, направление которого примерно ортогонально поверхности Ио. Нейтральная атмосфера спутника препятствует замыканию холловского тока. В результате происходит разделение зарядов и возникает мощное электрическое поле разделения зарядов, имеющее проекцию  $E_{\parallel}$  на направление магнитного тока, и величину, сравнимую с величиной индуцированного электрического поля. Как показали расчеты, под действием электрического поля разделения зарядов электроны ионосферы ускоряются и двигаются относительно ионов со скоростями, превышающими их тепловую скорость. В этом случае в зоне действия  $E_{\parallel}$

возникает бунемановская неустойчивость, приводящая к сильному разогреву электронов. В результате нагрева количество электронов, энергия которых достаточна для возбуждений ультрафиолетовых линий атомов и молекул в атмосфере спутников увеличивается настолько, что они оказываются способными обеспечить наблюдаемое ультрафиолетовое излучение от экваториальных спотов на Ио и из атмосферы Титана.

### Публикации

1. В. В. Зайцев, В. Е. Шапошников, Х. О. Рукер, Ускорение электронов в ионосфере Ио. *Астрон. ж.*, т. 47, № 8, 2003.

2. V. V. Zaitsev, V. E. Shaposhnikov, V. L. Khodachenko, H. O. Rucker, M. Panchenko, Acceleration of electrons in Titan's ionosphere. *JGR*, V. 115, A3, 2010.

3. V. E. Shaposhnikov, V. V. Zaitsev, H. O. Rucker, Origin of Io's ultraviolet aurora. *Planetary Radio Emission VII*, in press, 2011.

4. V. E. Shaposhnikov, V. V. Zaitsev, H. O. Rucker, Io's ultraviolet equatorial spots: Theory. *European Planetary Congress -2010, Roma, Italia, 20-24 September 2010, EPSC2010-36*.

1.12. Для миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн предложен и реализован резонансный метод измерения диэлектрических параметров изотропных плёночных материалов толщиной 1 - 100 мкм, не требующий для расчёта величины показателя преломления и поглощения дополнительной информации о толщине пленки.

С помощью спектрометра на базе открытого резонатора Фабри-Перо с рекордной точностью измерены диэлектрические параметры полиамидных пленок, широко применяемых в литографии высокого и сверхвысокого разрешения и других современных технологиях. Обнаружена значительная зависимость величины потерь от влажности воздуха (потери возрастают примерно в 4 раза при росте влажности от 0 до 50%), которая приводит к заметному изменению параметров и нестабильной работе микроэлектронных структур, изготовленных на их основе.

**Авторы:** С.Н. Власов, В.В. Паршин, Е.А. Серов

**Аннотация.** Для ММ и СубММ диапазонов длин волн предложен и реализован метод измерения диэлектрических параметров изотропных плёночных материалов толщиной 1 - 100 мкм. Принципиальным отличием метода от всех мировых аналогов является то, что для расчёта величины показателя преломления и поглощения не требуется информация о толщине пленки: толщина плёнки рассчитывается на основании тех же измерений, что и показатель преломления. Таким образом, устраняется основная ошибка в определении диэлектрических параметров плёнок, связанная с недостоверной информацией о толщине конкретной плёнки. Предложенный метод позволил полностью реализовать возможности, присущие резонаторному методу измерений, и получить относительную точность измерения показателя преломления  $\sim 10^{-3}$ , а величины поглощения ( $\text{tg}\delta$ ) до 1% - 5%.

В диапазоне частот 60-360 ГГц проведены исследования популярных плёночных материалов тефлона (политетрафторэтилен, PTFE), лавсана (майлар, полиэтилентерефталат, PETP), полиэтилена, полиамида. Выявлена заметная анизотропия рулонных плёночных материалов, а также зависимость их диэлектрических свойств от толщины и от влажности воздуха.

С рекордной точностью измерены диэлектрические параметры полиамидных пленок, широко применяемых в литографии высокого и сверхвысокого разрешения и других современных технологиях. Обнаружена значительная зависимость величины потерь от влажности воздуха (потери возрастают примерно в 4 раза при росте влажности

от 0 до 50%), которая приводит к заметному изменению параметров и нестабильной работе микроэлектронных структур, нанесенных на эти плёнки.

По чувствительности метод измерений на базе резонаторного спектрометра на порядок превосходит аналогичные зарубежные, а по уникально широкому диапазону частот и интервалу температур не имеет аналогов ни за рубежом, ни в России. В Российской Федерации подобные прецизионные исследования ведутся только в ИПФ РАН.

На базе экспериментальной установки возможно создание промышленного образца для контроля параметров плёнок в непрерывном режиме, в реальном масштабе времени.

### Публикации

1. С.Н. Власов, В.В. Паршин, Е.А. Серов. Методы исследования тонких диэлектрических пленок в миллиметровом диапазоне. ЖТФ, Т. 80, №12, с.73-79. 2010.

2. В.В. Паршин, Е.А. Серов. Метод измерения и диэлектрические параметры пленочных материалов для ММ диапазона. Proc. 18-th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2008). Ukraine. pp. 753-754, 2008.

3. Parshin V.V., Serov E.A. "Gas and condensed media investigation in MM and SubMM ranges". 20-th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2010). pp. 21-27, 13-17 September, Sevastopol, Ukraine, 2010. INV.

1.13. Созданы эффективные гиротронные приборы, работающие на модах объемного типа при повышенных импульсных напряжениях. На частоте 30 ГГц при длительности СВЧ импульса 0,5 мкс получены: а) в гиротроне-автогенераторе мощность 20 МВт при КПД 50%, б) в гироклистроне-усилителе мощность 10МВт при КПД 30% , коэффициенте усиления 30 дБ и полосе усиления 50 МГц.

**Авторы:** Гвоздев А.К., Зайцев Н.И., Запевалов С.А., Кузиков С.В., Моисеев М.А., Петелин М.И., Плоткин М.Е., Шевченко А.С.

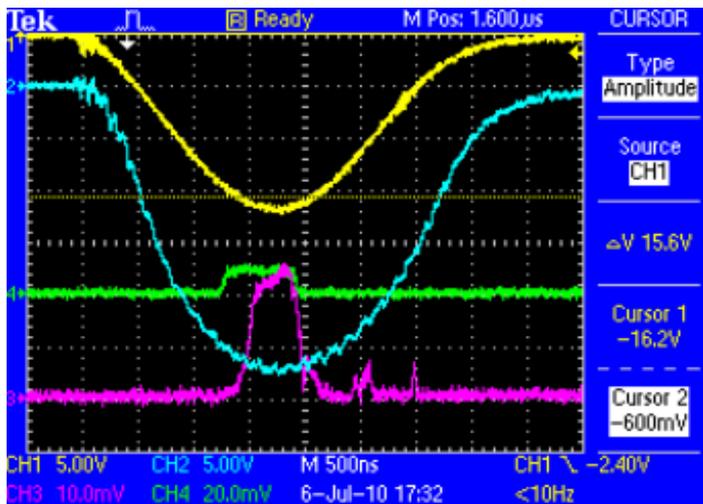
**Аннотация.** Последние несколько лет в ИПФ РАН ведутся работы по созданию мощного импульсного гироклистрона диапазона миллиметровых волн. В отличие от отечественных и зарубежных предшественников, работающих на симметричных модах TE01; TE02, клистрон работает на последовательности объемных мод высокого порядка TE52; TE53. Это позволяет значительно увеличить выходную мощность за счет увеличения поперечного сечения пространства взаимодействия без потери устойчивости системы к самовозбуждению и СВЧ пробую, а также упростить задачу формирования винтового электронного пучка необходимой интенсивности с малым разбросом электронов по поперечным скоростям и высоким пичч-фактором [Н. И. Зайцев, Е. В. Иляков, С. В. Кузиков, В. К. Лыгин, М. А. Моисеев, М. И. Петелин, А. С. Шевченко «Импульсный гироклистрон на объемной моде высокого порядка» Известия Вузов. Радиофизика, 2005, т.48, №10-11, с.830-834; N. I. Zaitsev, S. A. Zapevalov, E. V. Ilyakov, S. Yu. Kornishin, S. V. Kofanov, M. Yu. Kryltsov, I. S. Kulagin, V. K. Lygin, A. V. Malygin, V. N. Manuilov, B. Z. Movshevich, V. G. Perminov, M. I. Petelin, A. Sh. Fiks, A. S. Shevchenko, V. I. Tsalolikhin, V. V. Kladukhin, A. Krasnykh «500 KEV, 200 A microsecond electron accelerator with a repetition rate of 10 HZ», REEP.N THBH09 21 russian particle accelerators conference (RUPAC 2008); Yu. Yu. Danilov, V. G. Pavelyev, M. I. Petelin, N. I. Zaitsev, E. V. Zasytkin «Design and Modeling of Components for High-order-mode Gyrokystrons» 22-nd Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons, N.Novgorod, June 29- July 5, 2010]. Эксперименты выполнены на недавно созданном стенде «Сатурн Ф»- рис.1. На рис.2 представлены характерные осциллограммы напряжения на катоде, тока электронного пучка, огибающей входного и выходного СВЧ импульсов.

## Публикации

1. Yu.Yu.Danilov, V.G.Pavelyev, M.I.Petelin, N.I.Zaitsev, E.V.Zasyplin «Design and Modeling of Components for High-order-mode Gyrokystrons» 22-nd Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons, N.Novgorod, June 29- July 5, 2010.



Рис.1. Фотография верхней части экспериментального стенда (450 кэВ; 180 А, 1 мкс, 0 – 10 Гц). Видны элементы биологической защиты, криомагнит и СВЧ калориметр.



TDS 2024B - 13:49:53 06.07.2010

Рис.2. Характерные осциллограммы напряжения на катоде (желтый; 100 кВ/дел.), тока электронного пучка (синий; 20 А/дел), огибающей входного СВЧ импульса (зеленый амплитудой 12 кВт), огибающей выходного СВЧ импульса (красный; 5,3 Дж; 0,45 мкс. = 11,7 МВт).

1.14. Реализован полупроводниковый модулятор СВЧ излучения в 4-х миллиметровом диапазоне длин волн на основе эффекта фотопроводимости. При управлении модулятора фемтосекундным лазером с энергией в оптическом импульсе 10

нДж получена последовательность СВЧ импульсов с длительностью порядка 1 нс и частотой повторения 75 МГц.

**Авторы:** Г.Г.Денисов, М.Л.Кулыгин, Ю.В.Родин, Б.В.Шишкин, И.Е.Иляков

**Аннотация.** В настоящее время среди перспективных областей применения СВЧ излучения миллиметрового диапазона длин волн значительное место занимают управляемый термоядерный синтез, ускорение заряженных частиц и активная когерентная спектроскопия. При использовании СВЧ излучения возникают проблемы его коммутации, требующие:

- быстродействия переключения вплоть до наносекунд,
- когерентности отдельных пакетов импульсов между собой,
- охвата частотных диапазонов по СВЧ в десятки-сотни гигагерц.

Настоящее исследование направлено на практическую реализацию совокупности указанных требований. Предлагаемый модулятор содержит резонатор, представляющий собой симметричный участок плавного уширения прямоугольного волновода, заключенный между отрезками одномодового волновода стандартного сечения 3.6 мм x 1.8 мм, на концах которых расположены вход и выход коммутируемого СВЧ излучения. В средней части резонатора имеются два отверстия для связи собственных волн с поперечными индексами 1 и 3 прямоугольного волновода, к которым присоединены отрезки закритического волновода. В основании верхнего по схеме отверстия установлена пластина из полупроводника, которая освещается лазером через нижнее отверстие и меняет свойства из-за фотопроводимости. В верхнем отрезке закритического волновода установлен корректирующий винт для перестройки частот собственных колебаний резонатора. Резонатор с включенной в него пластиной из полупроводника работает аналогично полосовому режекторному фильтру, ослабляя проходящий СВЧ сигнал на выбранной частоте примерно на 40 дБ. При освещении пластины лазером добротность и центральная частота резонатора изменяются, при этом ранее ослабляемый СВЧ сигнал проходит через резонатор без изменений.

В качестве полупроводникового материала выбран нелегированный арсенид галлия (GaAs). Используемый образец полупроводника, при частотах СВЧ излучения около 70 ГГц, обладает диэлектрической проницаемостью и малым тангенсом угла омических потерь около  $10^{-4}$ . При освещении лазером концентрация носителей заряда быстро возрастает до значений  $10^{16} \dots 10^{19} \text{ см}^{-3}$  в приграничном слое глубиной порядка 1 мкм, коэффициент отражения СВЧ излучения от такого полупроводника близок к единице. Выбор арсенида галлия обусловлен его характерным временем релаксации носителей заряда порядка 1 нс. Полученная таким образом резонансная система с образцом арсенида галлия обладает добротностью около 500, на рабочих частотах имеет собственное время примерно 1 нс и обеспечивает глубину модуляции (разницу между «открытым» и «закрытым» состояниями, по аналогии с полупроводниковым транзистором) примерно 40 дБ. При подключении к входу модулятора источника когерентного СВЧ излучения, в режиме стабилизации фазы, все импульсы на выходе модулятора связаны по фазе, при этом спектр выходного сигнала весьма широк. Данное свойство является особенно ценным для когерентной спектроскопии, позволяя добиться высокого разрешения при сканировании объектов за счет сложения энергии отдельных импульсов в фазе на входе приемника спектроанализатора.

В процессе исследований был изготовлен и экспериментально исследован действующий макет модулятора СВЧ излучения, управляемый импульсами оптического лазерного излучения. Проведены численные расчеты конструктивных параметров модулятора методом FDTD, продемонстрировано их соответствие результатам эксперимента. Быстродействие модулятора составило 1 нс, характерная энергия управляющего лазерного импульса, достаточная для оптимального переключения,

равнялась 10 нДж, диапазон перестройки по частоте СВЧ излучения составил ~10% (66-72 ГГц). Экспериментально продемонстрировано сохранение работоспособности в широких пределах изменения параметров управляющего лазера.

### Публикации

1. М. Л. Кулыгин, Г. Г. Денисов, Ю. В. Родин, А. А. Вихарев, Б. В. Шишкин, И. Е. Иляков, В. В. Корчагин, Е. А. Новиков. Наносекундный полупроводниковый модулятор СВЧ-излучения диапазона 66-72 ГГц, управляемый лазерными импульсами / Препринт ИПФ РАН № 796, Нижний Новгород, июль 2010.

2. G. G. Denisov, M. L. Kulygin, Yu. V. Rodin, B. V. Shishkin and I.E. Ilyakov. Nanosecond Semiconductor Modulator of 66-72 GHz Microwaves Controlled by an Optical Laser. Proc. Of International conference "IRMMW-THz 2010", Rome, Italy, September 2010.

1.15. Экспериментально продемонстрирована принципиальная возможность получения мощности 1,5 МВт в 170 ГГц непрерывном гиротроне. В гиротроне используется резонатор с очень высокой рабочей модой **TE<sub>28.12</sub>**, что позволяет решить проблему охлаждения резонатора при указанной мощности. Требуемый режим эффективной одномодовой и одночастотной генерации обеспечивается малым скоростным разбросом в винтовом электронном пучке и оптимальным сценарием включения гиротрона.

**Авторы:** А.Н.Куфтин, В.Е.Запечалов, М.А.Моисеев, Н.А.Завольский, Г.Г.Денисов, А.В.Чирков, С.Ю.Корнишин (ИПФ РАН) совместно с ЗАО НПП «ГИКОМ»

**Аннотация:** Системы электронно-циклотронного (ЭЦ) нагрева и управления током для плазменных установок УТС базируются на гиротронах – мощных источниках СВЧ излучения диапазона миллиметровых длин волн. Для использования в будущей установке ИТЭР требуются гиротроны, работающие на частоте 170 ГГц с мощностью 1 МВт в импульсах порядка 1000 секунд. Разработка таких гиротронов в России ведется в кооперации трех организаций: Института прикладной физики РАН, НПП «ГИКОМ», ИЯС РНЦ «Курчатовский институт» уже в течение 10 лет.

Увеличение выходной мощности и надежности гиротронов, предназначенных для использования в комплексе ЭЦ нагрева ИТЕР, представляется чрезвычайно важным, так как стоимость единичного гиротрона очень высока, а их количество в этом комплексе составляет несколько десятков. Повышение мощности единичного гиротрона может в значительной степени упростить решение ряда технических проблем и снизить стоимость комплекса за счет уменьшения количества единичных модулей: собственно гиротронов, криомагнитов, систем питания, охлаждения и линий передачи высокочастотного излучения.

В рамках аван-проекта «Парус», проводимого НПП «Гиком» и ИПФ РАН, были обоснованы возможности и определены возможные пути создания сверхмощного (1,5-2 МВт) гиротрона непрерывной генерации в диапазоне 170 ГГц для предполагаемого использования в установке ИТЭР. Для реализации непрерывного гиротрона с выходной мощностью 1,5-2 МВт в криомагните с диаметром теплового отверстия 160 мм была выбрана рабочая мода цилиндрического резонатора  $TE_{28.12.1}$  (радиус резонатора превышает длину волны более чем на порядок), взаимодействующая с электронным пучком при значениях напряжений 90-100 кВ и токах 50-60 А. Проведена оптимизация параметров резонатора с учетом омических потерь и переизлучения волн на нерегулярностях профиля. Исследовано установление колебаний при включении гиротрона, конкуренция рабочей и паразитных мод, а также влияние пространственного заряда и его ионной компенсации. Рассмотрено влияние послерезонаторного

взаимодействия в выходном волноводном переходе. Показана возможность достижения КПД 35 % без рекуперации и более 50 % с одноступенчатой рекуперацией энергии электронного пучка при удельной мощности омических потерь 2.5–2.8 кВт/см<sup>2</sup>.

Для формирования винтового электронного пучка высокого уровня мощности в гиротроне использована магнетронно-инжекторная пушка (МИП). После проведенных аналитических оценок МИП была оптимизирована численно (методами траекторного анализа), сконструирована и изготовлена в нескольких вариантах с эмиттером на основе гексаборида лантана. Изготовленные варианты были исследованы экспериментально в моделирующих режимах методом тормозящего поля. Согласно расчетным и экспериментальным данным, для использования в длинноимпульсной и непрерывной версиях опытно-промышленного 170 ГГц гиротрона предпочтительна МИП, формирующая ламинарный пучок. В результате проведенных работ версия МИП с ламинарным пучком, оптимизированная численно и экспериментально, была выбрана для экспериментов с короткоимпульсным макетом гиротрона.

Разработан высокоэффективный преобразователь рабочей моды с малым уровнем потерь, поскольку зачастую именно рассеянное излучение внутри гиротрона определяет предельно достижимые выходные энергетические параметры. Все измерения проводились в режиме с заземленным коллектором (без рекуперации остаточной энергии).

В экспериментах с короткоимпульсным макетом гиротрона обеспечена устойчивая одномодовая генерация на высокой рабочей моде в заданном проектном режиме (100 кВ, 50 А) и достигнуты требуемые уровни выходной мощности с КПД 32.6 % (100кВ, 50А,  $P_{\max}=1.63$ МВт). Максимальная выходная мощность 2.1 МВт с эффективностью 34 % была достигнута при токе пучка 60 А.

На основании этих работ сконструирован опытно-промышленный прототип 1,5 МВт гиротрона пригодный для квазинепрерывного режима, за исключением узлов выходного окна и коллектора. В предварительных испытаниях, в режиме коротких импульсов, в этом гиротроне практически воспроизведены результаты короткоимпульсного макета.

## Публикации

1. G.G.Denisov, A.G.Litvak, V.E.Myasnikov, E.M.Tai, V.I.Ilin, V.E.Zapevalov. Gyrotrons for Fusion Research. State of the art and progress trends. Abstracts of Strong microwaves: sources and applications, VII International Workshop, Nizhny Novgorod, Russia, July 27-August 2, 2008.

2. S.V.Usachev, L.G.Popov, V.I.Ilin, Yu.V.Roschin, M.V.Agapova, A.V.Chirkov, G.G.Denisov, A.Ph.Gnedenkov, V.N.Ilin, A.N.Kostyna, A.N.Kuftin, A.G.Litvak, V.I.Malygin, V.E.Myasnikov, V.O.Nichiporenko, V.G.Rukavishnikova, E.A.Soluyanova, E.M.Tai, V.E.Zapevalov. Test results of 170GHz/1MW/50% Gyrotron for ITER. Abstracts of Strong microwaves: sources and applications, VII International Workshop, Nizhny Novgorod, Russia, July 27-August 2, 2008.

3. L.G.Popov, G.G.Denisov, A.G.Litvak, M.V.Agapova, A.F.Gnedenkov, A.N.Kostyna, V.O.Nichiporenko, V.E.Myasnikov, E.M.Tai, S.V.Usachev, V.E.Zapevalov, A.V.Chirkov, V.I.Ilin, V.N.Ilin, A.N.Kuftin, S.A.Malygin, V.I.Malygina, V.V.Parshin, A.B.Pavel'ev, V.G.Rukavishnikova, Yu.V.Roschin, E.V.Sokolov, E.A.Soluyanova, A.L.Vikharev. Development in Russia of 170 GHz gyrotron for ITER. The 33-th Int. Conference on Infrared and Millimeter Waves and 16-th Int. Conference on Terahertz Electronics, 2008, Sept.2- Sept.7, Pasadena, USA, Conference Digest, W4U4.1472.

4. A.G.Litvak, G.G.Denisov, M.V.Agapova, V.E.Myasnikov, L.G.Popov, E.M.Tai, S.V.Usachev, V.E.Zapevalov, A.V.Chirkov, V.I.Ilin, A.N.Kuftin, V.I.Malygin, E.V.Sokolov, E.A.Soluyanova Recent Results of Development in Russia of 170 GHz Gyrotron for ITER. The

1.16. На основе длительных (в течение конвективных сезонов 2005-2010 гг.) наземных измерений электрического поля в разнесенных пунктах выявлены основные особенности спектральных характеристик возмущений поля грозовых облаков. Показано, что по спектрам возмущений поля грозового облака на земле можно определять среднее время релаксации поля внутриоблачной среды (типичное значение которого составило десять секунд) и эффективную проводимость облачной среды.

**Авторы:** В.В.Клименко, Е.А.Мареев, М.В.Шаталина, Е.В.Широков, Ю.В. Шлюгаев

**Аннотация.** На основе наземных измерений электрического поля в разнесенных пунктах исследованы спектральные характеристики возмущений электрического поля во время грозовых событий и проведено сравнение этих характеристик со спектрами поля невозмущенной атмосферы. В работе использованы данные электростатических флюксметров, установленных в нескольких пунктах Нижнего Новгорода и его окрестностей в течение конвективных сезонов 2005-2010 гг. Выделены две основных компоненты возмущений электрического поля: а) «регулярная» компонента с характерными временами возмущений от нескольких минут до часа и более; б) импульсная компонента поля, обусловленная разрядами внутри облака и из облака на землю, для которой характерными временами можно считать средний интервал между импульсами и длительность самого импульсного возмущения. Экспериментально установлено, что в спектральной плотности мощности (СПМ) возмущений электрического поля имеются три области: 1) область с периодами более ~20 мин., где СПМ очень слабо зависит от периода возмущений; 2) с периодами от ~20 мин. до ~1 мин., где СПМ спадает по экспоненте; 3) область спектра импульсного процесса, с точкой перегиба в окрестности ~10 с, и спадающего как  $\sim 1/\omega^2$  на высоких частотах. Указанные области спектра описывают: 1) динамику конвективной ячейки с пространственными масштабами в несколько км; 2) динамику и пространственный спектр неоднородностей электрического заряда внутри ячейки с масштабами от сотни метров до 1-2 км; 3) время восстановления электрического заряда сторонним током, зависящее от проводимости внутри облака и в окружающей атмосфере. Результаты проведенных измерений позволяют утверждать, что по спектрам возмущений поля грозового облака можно судить о среднем времени релаксации поля, типичное значение которого составило десять секунд, и эффективную проводимость облачной среды. Полученные результаты важны для моделирования электрической активности грозовых облаков, а также для выявления роли квазистационарных и импульсных процессов в глобальной атмосферной электрической цепи. Дело в том, что в последнее время разработан ряд новых моделей, позволяющих описывать нестационарные и электромагнитные процессы в глобальной электрической цепи. Установлено, что и вспышки облако-земля, и внутриоблачные вспышки, наряду с быстрыми, генерируют значительные по величине медленные переходные токи, дающие вклад в глобальную цепь. Эффективность внутриоблачных вспышек в среднем меньше, чем у вспышек облако-земля, однако их средний вклад в токовую цепь может быть сравним, поскольку число внутриоблачных вспышек существенно превосходит число вспышек облако-земля. Эффективная проводимость облачной среды, особенно на стадии высокой молниевой активности, является критическим параметром для моделирования нестационарных явлений в глобальной цепи. Можно надеяться, что в ближайшее время нестационарные модели глобальной цепи будут доведены до уровня, позволяющего описывать крупномасштабные геофизические возмущения и долгосрочную эволюцию системы. Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований

Отделения физических наук РАН «Электродинамика атмосферы, радиофизические методы исследования атмосферных процессов».

### Публикации

1. E.A.Mareev, D.I.Iudin, Yu.V.Shlugaev, V.V.Klimenko. Lightning occurrence: spatio-temporal dynamics and its fractal simulation // Proc. Int. Conf. Lightning Protection, Cagliari, Sept 2010.
2. E.A.Mareev, D.I.Iudin, Yu.V.Shlugaev, V.V.Klimenko. Statistical properties of lightning discharge // Atmospheric research (submitted).
3. В.В.Клименко, Е.А.Мареєв, Yu.V.Shlugaev, Е.В.Широков, М.В.Шаталина. Статистические характеристики электрической активности грозовых облаков // Изв. РАН - ФАО (направлена в печать).
4. Е.В.Широков, В.В.Клименко, Е.А.Мареєв, Ю.В.Шлюгаев. Статистические характеристики электрической активности грозовых облаков // Тр. 14-й Всерос. конф. мол. ученых "Состав атмосферы. Климатические эффекты. Атмосферное электричество". 17-20 мая 2010, Нижний Новгород, с.132-134.
5. Е.А.Мареєв. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // УФН. 2010. Т.180, №5. С.527-534.

1.17. На основании результатов модельных лабораторных экспериментов, выполненных на крупномасштабном плазменном стенде «Крот», предложен новый способ параметрической генерации низкочастотных волн электронами замагниченной плазмы, ускоренными в ближнем поле антенны в условиях электронно-циклотронного резонанса. Амплитудная модуляция сигнала, подводимого к антенне, приводит к излучению волн на частоте модуляции в окружающую плазму; при этом протяженная область плазмы с ускоренными электронами выступает в роли параметрической «бестелесной» антенны. Предложенный способ перспективен для генерации низкочастотных волн свистового диапазона в ионосфере Земли с борта космического аппарата.

**Авторы:** М.Е.Гущин, С.В.Коробков, А.В.Костров, Д.А.Одзерихо, А.В.Стриковский

**Аннотация.** В экспериментах по активному радиочастотному воздействию на околоземную плазму широко применяются антенные системы, размещаемые на борту космических аппаратов (КА). Как правило, работа мощных (до 1 кВт) бортовых передатчиков сопровождается сильной модификацией плазмы вблизи КА и формированием потоков ускоренных частиц, особенно при приближении рабочей частоты к резонансным частотам - электронной плазменной, электронной циклотронной и их гармоникам.

Авторами предлагается использовать эффекты резонансного ускорения заряженных частиц в ближней зоне бортовых антенн КА для параметрической генерации низкочастотных (НЧ) волн, прямое возбуждение которых с борта КА малоэффективно. Особый интерес представляет задача генерации волн свистового диапазона, актуальная в связи с постановкой активных экспериментов по зондированию околоземной плазмы волнами очень низких частот (ОНЧ), организации контролируемых высыпаний энергичных частиц радиационных поясов Земли и волновому воздействию на области формирования естественных магнитосферных излучений. В качестве основного механизма формирования потоков энергичных электронов рассматривается их ускорение в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), т.е. при приближении частоты бортового передатчика КА к локальным значениям электронной циклотронной частоты и ее гармоник. Этот механизм представляется наиболее перспективным и надежным, так как циклотронное ускорение электронов наблюдается в большинстве активных ионосферных

экспериментов, проводимых с использованием мощных антенных систем на борту КА. Поскольку в условиях ЭЦР электроны увеличивают свою поперечную энергию и приобретают дополнительный магнитный момент, в плазме наблюдается диамагнитный эффект: уменьшение индукции внешнего магнитного поля в области, содержащей быстрые частицы. Если ВЧ сигнал, подводимый к антенне, модулирован по амплитуде, то поток ускоренных электронов, и, соответственно, наведенный в возмущенной области плазмы магнитный момент изменяются с периодом модуляции. В результате, протяженная область пространства, в которую из ближней зоны передатчика поступает модулированный поток ускоренных по поперечной энергии электронов, может выступать в роли «бестелесной» антенны, излучающей волны на частоте модуляции в окружающую плазму.

Модельные лабораторные эксперименты, целью которых является оценка возможности генерации квазистационарных магнитных полей и НЧ волн при ЭЦР нагреве ионосферной плазмы с борта КА, были проведены на крупномасштабном плазменном стенде «Крот». Квазиоднородный цилиндрический столб замагниченной плазмы длиной около 500 см и диаметром 150 см формировался импульсным высокочастотным индукционным разрядом низкого давления в атмосфере инертного газа (аргона). Параметры экспериментов выбирались на основе преобразований подобия с масштабным множителем 100, равным отношению характерных размеров бортовой антенны КА (~10 м) и ее уменьшенной лабораторной модели (~10 см), и соответствовали физическим условиям в плотной плазме ионосферы Земли. В экспериментах использовались модели рамочных и электрических дипольных антенн.

Как показали эксперименты, в плазме уверенно регистрируется диамагнитный эффект, обусловленный резонансным ускорением электронов в ближней зоне антенны. Возмущения магнитного поля максимальны при приближении частоты сигнала к первой и второй гармоникам электронной гирочастоты. Величина диамагнитного эффекта пропорциональна мощности ВЧ импульса, подводимого к антенне, и достигает 0,1% от величины внешнего (статического) магнитного поля. При амплитудной модуляции ВЧ сигнала, подводимого к антенне, в плазме возбуждаются НЧ электромагнитные поля на частоте модуляции. Измерения позволяют однозначно идентифицировать НЧ поля как косые волны свистового диапазона, продольная фазовая скорость которых значительно превышает поперечную фазовую скорость. Наблюдается возбуждение волн конической рефракции, волновой вектор которых практически перпендикулярен к внешнему магнитному полю, а групповая скорость направлена вдоль поля. Преимущественное возбуждение волн данного типа обусловлено геометрией «бестелесной» антенны, которая сильно вытянута вдоль внешнего магнитного поля (что соответствует низким продольным волновым числам, но имеет малый поперечный размер (что соответствует высоким поперечным волновым числам).

С использованием преобразований подобия, по результатам лабораторных экспериментов был оценен уровень квазистационарных и НЧ возмущений магнитного поля, которые могут быть получены в активных экспериментах в верхней ионосфере с использованием мощных антенных систем, установленных на борту КА. При мощности передатчика 100-1000 Вт, нагруженного на антенну с характерными размерами 10-100 м, используя значение масштабного множителя около 100, величина квазистационарных диамагнитных возмущений в силовой трубке, опирающейся на антенну, оценивается на уровне 10-100 нТл, что сравнимо с возмущениями магнитного поля при инъекции сильноточных пучков энергичных электронов с борта КА. Амплитуда переменного магнитного поля в ОНЧ свистовых волнах с частотами 1-10 кГц, возбуждаемых при подаче на бортовую антенну КА мощного амплитудно-модулированного сигнала, может достигать величин порядка 0,1-1 нТл.

Таким образом, результаты первых модельных экспериментов показывают, что эффект циклотронного ускорения электронов в ближней зоне антенн космического

базирования может быть использован в целях генерации квазистационарных и НЧ возмущений ионосферной плазмы. К достоинствам предлагаемой схемы генерации НЧ волн относится возможность широкополосной перестройки по низкой частоте. Протяженная «бестелесная» антенна является антенной магнитного типа, поскольку формируется замкнутыми электронными токами, возбуждение которых не связано с модуляцией плотности плазмы. В результате реализуются предпочтительные условия для возбуждения электромагнитных НЧ волн, например – свистовых или альфвеновских.

### Публикации

1. М.Е. Гушин, С.В. Коробков, А.В. Костров, Д.А. Одзерихо, С.Э. Привер, А.В. Стриковский. Параметрическая генерация низкочастотных волн электронами плазмы, ускоренными в условиях электронно-циклотронного резонанса. Письма в ЖЭТФ, Т.92, №2, с.89-94 (2010).

2. М.Е. Гушин, С.В. Коробков, А.В. Костров, Д.А. Одзерихо, А.В. Стриковский. Циклотронное ускорение электронов в замагниченной плазме, окружающей низкочастотные антенные системы, и генерация свистовых волн. Тезисы докладов конференции «Физика плазмы в солнечной системе», г. Москва, 8-12 февраля 2010 г., с.88.

3. M. Gushchin, S. Korobkov, A. Kostrov, D. Odzerikho, A. Strikovskiy. Cyclotron heating of electrons by antennas in a weakly magnetized plasma and parametric generation of low frequency waves. Abstracts of 38<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany, July 18-25, 2010, C52-0014-10.

4. A.V. Kostrov, M.E. Gushchin, S.V. Korobkov, D.A. Odzerikho, A.V. Strikovskiy. Parametric generation of low frequency waves by electrons accelerated in ECR regime. Abstracts of European Planetary Science Congress, Rome, Italy, September 19-24, 2010, abstract EPSC2010-158.

1.18. С помощью химико-климатической модели высокого разрешения и с учетом обратных связей между изменениями состава и структуры атмосферы доказана климатологическая значимость грозовой продукции окислов азота. Содержание озона меняется в несколько раз при изменении скорости грозового образования окислов азота в рамках естественной неопределенности. Увеличение окислов азота грозового происхождения ведет к существенному увеличению гидроксильного радикала в тропосфере. Эффект изменения температуры, усредненный по ансамблю за десятилетие, в отдельных районах достигает нескольких градусов.

**Авторы:** С.П.Смышляев (Российский государственный гидрометеорологический университет), Е.А.Мареев (ИПФ РАН), В.Я.Галин (Институт вычислительной математики РАН)

**Аннотация.** С помощью химико-климатической модели высокого разрешения и с учетом обратных связей между изменениями состава и структуры атмосферы впервые продемонстрирована климатологическая значимость грозовой продукции окислов азота. Проведены модельные расчеты чувствительности температуры атмосферы к неопределенности в скоростях грозовой продукции окислов азота на высотах верхней тропосферы и нижней стратосферы. Естественная неопределенность глобальной скорости продукции окислов азота при молниевых вспышках оценивалась в пределах от 2 до 20 TgN/год. Изменение содержания озона и других малых газов в атмосфере в результате изменения молниевой продукции окислов азота создает потенциал для изменения локального нагрева и охлаждения атмосферы, условий глобальной циркуляции, переноса тепла и массы и, следовательно, изменения температуры атмосферы.

Проведенные оценки показали, что в результате изменчивости грозовой продукции окислов азота и результирующей изменчивости концентраций радиационно-активных газов в атмосфере температура более всего меняется в нижней и средней стратосфере в полярных районах. Этот эффект может достигать нескольких градусов в среднем период в несколько десятилетий и превышать десять градусов в отдельные годы. Наиболее значимое изменение температуры отмечается в период полярной ночи, что, при отсутствии локального нагрева, связано с изменением притока и оттока тепла атмосферной циркуляцией, и в период полярной весны, когда развиваются озоновые аномалии, и изменение температуры связано как с изменением потока тепла, так и с изменением локального нагрева атмосферы в результате изменения концентрации озона.

Изменение термодинамических условий в верхней тропосфере, где происходят грозовые явления, создает потенциал для обратных связей между изменением состава атмосферы в результате молниевой активности, возникающими в результате этого изменениями температуры и соответствующими изменениями условий для возникновения молниевых разрядов. Проведенное модельное исследование показало, что в средне-климатическом смысле изменения температуры в верхней тропосфере в тропических широтах, где происходит наибольшее количество грозовых явлений, не является существенным. Однако в отдельные годы в результате изменения молниевой продукции окислов азота в пределах естественной изменчивости могут создаваться условия, при которых температура в верхней тропосфере может меняться до 10 градусов как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения, что может привести к изменению условий формирования грозовых разрядов и, соответственно, к возникновению обратных связей между скоростью молниевой продукции окислов азота и формированием молниевых разрядов. В связи с этим актуальным становится повышение точности оценок скорости формирования окислов азота при молниевых разрядах и использование в моделях газового состава и общей циркуляции атмосферы не климатологических данных, а теоретических параметризаций, позволяющих учесть локальные особенности условий протекания молниевых эффектов и возникающие при этом процессы формирования окислов азота.

### Публикации

1. Смышляев С.П., Мареев Е.А., Галин В.Я. Моделирование влияния грозовой активности на газовый состав атмосферы // Изв.РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 4. С. 487–504.
2. Смышляев С.П., Мареев Е.А., Галин В.Я. Моделирование не прямых эффектов влияния грозовой активности на температуру атмосферы // Изв.РАН. Физика атмосферы и океана. 2010 (направлена в печать).
3. Смышляев С. П. , Галин В. Я. , Шаарийбуу Г., Моцаков М. А. Моделирование изменчивости газовых и аэрозольных составляющих в стратосфере полярных районов // Изв.РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 3. С. 291–306.
4. Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М. Совместная химико-климатическая модель атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т.43. №4. С. 437-452.
5. Mareev E.A. Atmospheric electrical processes of different scales and their implications in the climate system // Proc. Third Int. Conf. "Frontiers of Nonlinear Physics", Nizhny Novgorod – St-Petersbourg, Jul 2010.

1.19. Разработан новый подход для решения задач распространения электромагнитных волн в средах с тензорным диэлектрическим откликом и пространственной дисперсией, основанный на формализме операторного уравнения Риккати. Метод позволяет свести исходную граничную задачу для уравнений Максвелла в

неоднородной среде к эквивалентной задаче эволюционного типа, дающей широкие возможности для поиска новых аналитических решений. Полученные эволюционные уравнения устойчивы в областях линейного взаимодействия и резонансной диссипации волн, что позволяет использовать стандартные методы численного интегрирования при решении «жестких» задач распространения волн. Данная техника успешно применена для исследования взаимодействия связанных волн в неоднородной горячей магнитоактивной плазме в задачах электронного циклотронного нагрева и диагностики плотной плазмы в токамаках и стеллараторах.

**Авторы:** А.Г. Шалашов, Е.Д. Господчиков

**Аннотация.** Разработан новый способ решения задач распространения и линейной трансформации электромагнитных волн, являющийся обобщением метода инвариантного погружения применительно к задачам распространения электромагнитных волн в сложных средах с тензорным электромагнитным откликом и пространственной дисперсией, описываемой производными конечного порядка в диэлектрическом тензоре. В основе метода лежит представление точного волнового поля в неоднородной среде в виде совокупности взаимодействующих нормальных мод, разбитых на две группы, отвечающие встречным волнам. Если задача допускает такое разделение, то существует возможность определения матричного «импедансного» оператора, характеризующего связь между встречными волнами. Этот оператор можно найти путем решения нелинейного эволюционного уравнения типа Рикатти с универсальными граничными условиями, не зависящими от деталей падающего на слой излучения. По известному импедансному оператору для любой заданной структуры падающего излучения волновое поле во всем пространстве восстанавливается путем тривиальной линейной операции. Таким образом, метод позволяет свести исходную граничную задачу для уравнений Максвелла в неоднородной среде к эквивалентной задаче эволюционного типа. Данное представление удобно как для аналитического исследования, так и для численного моделирования. В частности, в отличие от исходных уравнений Максвелла эволюционные уравнения устойчивы в областях линейного взаимодействия и резонансной диссипации волн, что позволяет применять стандартные методы численного интегрирования при решении «жестких» задач распространения волн. Вычислительные методы, основанные на импедансной технике, могут составить конкуренцию методу конечных элементов или FDTD методу, обычно применяемых для моделирования волновых процессов в «жестких» средах.

Развитая техника применена для решения ряда достаточно сложных электродинамических задач в теплой магнитоактивной плазме. В частности, был подробно исследован так называемый O-X-V процесс, используемый для нагрева за критической плазмы в токамаках и стеллараторах волнами электронно-циклотронного диапазона. В этом процессе вводимая в плазму под определенным углом электромагнитная волна испытывает серию линейных трансформаций и в итоге преобразуется в электростатические бернштейновские колебания, которые поглощаются в условиях циклотронного резонанса в центральных областях плазменного шнура, недоступных для электромагнитных волн. Впервые было проведено полное моделирование всего процесса трансформации без разделения на области O-X и X-V взаимодействия с учетом реалистичной модели поглощения бернштейновских колебаний за счет пространственной дисперсии. Исследованы эффекты влияния трехмерного вращения магнитного поля (шира) на эффективность ввода электромагнитных волн. Показано, что в крупномасштабных тороидальных ловушках дисперсия бернштейновских колебаний вблизи верхнегибридного и циклотронного резонансов, а также шир магнитного поля слабо влияют на эффективность O-X-V процесса, которая в результате практически целиком определяется эффективностью линейной трансформации обыкновенной волны в

необыкновенную в окрестности плазменного резонанса. Также были получены новые результаты в задаче о резонансном брэгговском рассеянии высокочастотных волн в замагниченной плазме с модуляцией плотности, важные для развития рефлектометрических методов диагностики плазмы.

### Публикации

1. А. Г. Шалашов, Е. Д. Господчиков. «Импедансный» метод решения задач распространения электромагнитных волн в анизотропных и гиротропных средах. УФН, принята к публикации (2010)

2. A. G. Shalashov, E. D. Gospodchikov. Impedance technique for modeling of electromagnetic wave propagation in anisotropic and gyrotropic media // Plasma Phys. Contr. Fusion, 52, 025007 (2010)

3. A. G. Shalashov, E. D. Gospodchikov. On the O-X mode coupling in 3D sheared magnetic field // Plasma Phys. Control. Fusion, 52, 115001 (2010).

4. A.G.Shalashov, E.D. Gospodchikov. Mode-impedance technique for modeling of electromagnetic wave propagation in plasma // Вопросы атомной науки и техники, направлена в печать (2010)

1.20. Выполнен обзор около 100 областей образования массивных звёзд, расположенных в разных частях Галактики, в наиболее информативных радиолниях молекул и в континууме на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. В результате определены их основные физические характеристики в зависимости от положения в Галактике, внутренняя структура и особенности химического состава.

**Авторы:** И.И. Зинченко, А.В. Лапинов, Л.Е. Пирогов, Н.Р. Троицкий

**Аннотация.** Исследования областей образования массивных звёзд важны для лучшего понимания механизма образования таких звёзд, который пока не вполне ясен. Авторами на протяжении длительного времени проводились обзоры таких областей в различных молекулярных линиях и в континууме. Наблюдались различные выборки таких объектов, которые отбирались по критериям наличия тех или иных признаков процесса образования звёзд большой массы: мазерного излучения некоторых молекул, мощного ИК излучения, зон ионизованного водорода. Эти частично пересекающиеся выборки включали в себя по несколько десятков (до примерно сотни) объектов. Наблюдения проводились в основном на миллиметровых и субмиллиметровых волнах при помощи различных инструментов. Часть обзоров включала в себя картирование источников. В частности, были выполнены такие работы:

- Обзор областей Шарплеса в линии HCN J=1-0
- Обзор ярких ИК источников IRAS во внешней Галактике в линии HCN J=1-0
- Обзор мазеров H<sub>2</sub>O в линии CS J=2-1
- Наблюдения NH<sub>3</sub> (1,1) и (2,2)
- Обзор массивных ядер в линиях HNCO, C<sup>18</sup>O и SO
- Обзор в линии N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> (1-0)
- Обзор в линиях HC<sub>3</sub>N
- Обзор «холодных» ИК источников IRAS в линиях CO, <sup>13</sup>CO, C<sup>18</sup>O
- Детальные исследования отдельных сгустков в линиях HCN, HCO<sup>+</sup>, C<sup>18</sup>O, CH<sub>3</sub>OH, SiO, etc.
- Обзор выборки плотных сгустков в континууме на волне 1.2 мм

В результате этих обзоров определены основные физические характеристики плотных сгустков в этих областях (размер, масса, плотность, температура, дисперсия скоростей) и построены их статистические распределения. Найдена зависимость

некоторых из этих характеристик от галактоцентрического радиуса. По картам излучения пыли и некоторых молекул определены радиальные профили плотности, температуры и дисперсии скоростей. Найдено, в частности, что профили плотности хорошо описываются решением Боннора-Эберта для изотермичного облака, ограниченного внешним давлением. Дисперсия скоростей постоянна или уменьшается по радиусу облака. Выявлены эффекты систематической химической дифференциации молекул в этих областях и показано, что они, вероятно, в значительной степени обусловлены вариациями степени ионизации.

### Публикации

1. Zinchenko, I.; Pirogov, L.; Toriseva, M. Studies of dense molecular cores in regions of massive star formation. VII. Core properties on the galactic scale. *Astronomy and Astrophysics Suppl.*, 1998, v.133, p.337-352
2. Pirogov, L. J=1-0 HCN toward bright far-infrared sources in the outer Galaxy. *Astronomy and Astrophysics*, v.348, p.600-613 (1999)
3. Zinchenko, I.; Henkel, C.; Mao, R. Q. HNC0 in massive galactic dense cores. *Astronomy and Astrophysics*, v.361, p.1079-1094 (2000)
4. Pirogov, L.; Zinchenko, I.; Caselli, P.; Johansson, L. E. B.; Myers, P. C. N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(1-0) survey of massive molecular cloud cores. *Astron. Astrophys.* 2003, v. 405, p. 639-654
5. Н.Р. Троицкий, Л.Е. Пирогов, И.И. Зинченко, Дж. Янг. Обзор областей звездообразования, связанных с инфракрасными источниками, в линии J=1-0 молекулы CO и ее изотопов. Результаты наблюдений линии C<sup>18</sup>O (J=1-0). *Изв. Вузов. Радиофизика*, 2005, т. 48, с. 553-562
6. С.Ю. Малафеев, И.И. Зинченко, Л.Е. Пирогов, Л.Е.Б.Йоханссон. Исследование пространственных вариаций температуры в областях образования массивных звезд. *Письма в Астрон. ж.*, 2005, т. 31, с. 262-268
7. Pirogov, L.; Zinchenko, I.; Caselli, P.; Johansson, L. E. B. Chemical differentiation in regions of high-mass star formation. CS, dust, and N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> in southern sources. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 461, pp.523-535 (2007)
8. Л.Е. Пирогов, И.И. Зинченко. Поиск мелкомасштабной фрагментарности в плотных ядрах молекулярных облаков. *Астрономический журнал* 2008, т.85, No 12, стр.1072-1085
9. Пирогов Л.Е.. Профили плотности в ядрах молекулярных облаков, связанных с областями образования массивных звезд. *Астрономический Журнал* 2009, т.86, № 12, стр.1-9
10. 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)

