

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

Отделение физики плазмы и электроники больших мощностей

1.1. Обнаружение эффекта параметрического резонанса между 5-минутными осцилляциями скорости вещества в солнечной фотосфере и звуковыми колебаниями в корональных магнитных петлях

При исследовании микроволнового излучения активных областей на Солнце обнаружен эффект параметрического резонанса между 5-минутными осцилляциями скорости вещества в солнечной фотосфере и звуковыми колебаниями в корональных магнитных петлях. Эффект проявляется в одновременном возбуждении в корональной магнитной петле колебаний с периодами 5, 10 и 3,3 мин, которые соответствуют частоте накачки, субгармонике и первой верхней частоте параметрического резонанса. Поскольку 5-минутные фотосферные колебания не могут непосредственно проникать в корону, параметрический резонанс служит эффективным «каналом» передачи энергии фотосферных осцилляций в верхние слои солнечной атмосферы и открывает важные перспективы в понимании механизмов нагрева корональной плазмы.

Авторы: В. В. Зайцев, А. Г. Кисляков (ИПФ РАН).

Аннотация. Квазипериодическая модуляция микроволнового излучения солнечных вспышек на частоте 37 ГГц была исследована методом Вигнера-Виля на примере 17 событий, наблюдавшихся в период 1989–2000 гг. в обсерватории Метсахови. Приблизительно в 90% наблюдавшихся микроволновых всплесков обнаруживается низкочастотная модуляция с периодами ~5 мин. Возможная причина такой модуляции связана с модуляцией тока, текущего вдоль корональной магнитной петли, 5 мин колебаниями скорости фотосферной конвекции. Приблизительно в 70% случаев одновременно с 5 мин осцилляциями в одних и тех же событиях наблюдались колебания с периодами ~10 мин. В 30% случаев наблюдалась одновременная модуляция микроволнового излучения тремя низкочастотными сигналами с периодами 3 мин, 5 мин, и 10 мин.

Показано, что наиболее вероятная причина «двойной» и «тройной» модуляции может быть связана с параметрическим возбуждением в корональной магнитной петле звуковых колебаний с периодами 10 мин и 3 мин в результате взаимодействия с 5 мин фотосферными колебаниями. Это происходит в том случае, если период собственных звуковых колебаний магнитной петли близок к 10 минутам (условие параметрического резонанса). При параметрической неустойчивости 10 мин колебания возбуждаются легче, чем 3 мин колебания, поэтому последние наблюдаются реже. По этой же причине наблюдаемая ширина линии 10 мин колебаний значительно больше, чем у 3 мин колебаний.

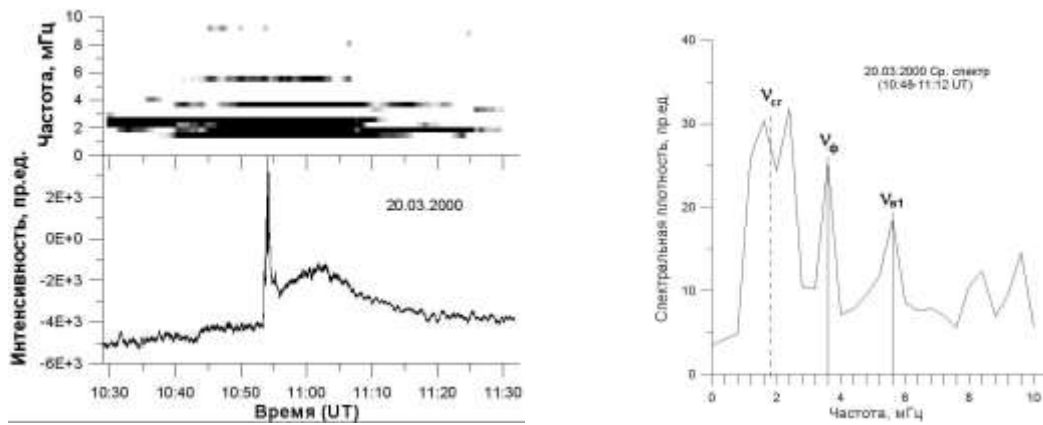


Рис. 1. Динамический спектр модуляции интенсивности радиоизлучения Солнца на частоте 37 ГГц и профиль всплеска, наблюдавшегося 20 марта 2000 г. Справа – сечение динамического спектра 20.03.2000 по времени (при усреднении на интервале ~ 24 мин). Прерывистой линией помечена частота субгармоники 1.8 мГц, соответствующей периоду «10-мин» колебаний, отмечены также частоты «5-мин» (3.6 мГц) и «3-мин» (5.6 мГц) колебаний.

1.2. Явление кооперативной рекомбинации электрон-дырочной плазмы^{*)}

Предсказано и открыто экспериментально явление кооперативной рекомбинации электрон-дырочной плазмы, созданной фемтосекундным лазерным импульсом в полупроводниковой структуре с квантовыми ямами, помещенной в сильное поперечное магнитное поле.

Авторы: В. В. Кочаровский, Вл.В., Кочаровский (ИПФ РАН), А. А. Belyanin (Department of Physics, Texas A&M University, USA).

Аннотация. Как известно в физике лазеров, переход к режимам суперфлюоресценции и сверхизлучения открывает широкие перспективы для генерации предельно коротких импульсов, так как обеспечивает, в отличие от балансного лазерного режима, максимально возможную для данной активной среды скорость вынужденных излучательных переходов, которая превышает скорости некогерентных процессов релаксации в среде. В применении к полупроводниковым гетероструктурам и лазерам это означает реализацию кооперативной, когерентной рекомбинации электрон-дырочных пар, которая происходит быстрее, чем некогерентные процессы излучательной или безызлучательной рекомбинации и внутризонного рассеяния носителей. Указанный процесс ранее обсуждался лишь для экситонов, а для свободных электронов и дырок он был предсказан в работах сотрудников ИПФ РАН А. А. Белянина В. В. Кочаровского и Вл. В. Кочаровского (см., например, [1]), где были предложены различные схемы его получения и показана возможность его использования для получения фемтосекундных импульсов в специальных гетеролазерах на основе стандартных для оптоэлектроники материалов типа GaAs.

Основными трудностями на пути осуществления кооперативной рекомбинации электрон-дырочной плазмы, т. е. свободных электронов и дырок, являются создание большой плотности носителей и преодоление быстрой безызлучательной релаксации их оптической поляризации, которая связана с внутризонным рассеянием и в объемных полупроводниках происходит за время порядка 100 фс. Естественный способ решения последней проблемы состоит в использовании низкоразмерных структур, в которых скорость межзонных излучательных переходов возрастает благодаря увеличению спектральной плотности состояний носителей вблизи краев запрещенной зоны, в то время как внутризонное рассеяние может быть подавлено. Идеальными в этом отношении являются многослойные структуры так называемых циклотронных квантовых точек, которые образуются при наложении квантующего магнитного поля на гетероструктуру с

квантовыми ямами в направлении, перпендикулярном их плоскостям [1, 2]. В этом случае движение носителей оказывается полностью квантованным – электроны и дырки, созданные накачкой (инжекционной или оптической), распределяются по уровням Ландау (за время порядка 100 фс).

Именно в такой схеме на основе предложенного в работах [1] эксперимента и развитой детальной теории было впервые установлено существование явления кооперативной рекомбинации электрон-дырочных пар в плотной квазидвумерной плазме, созданной фемтосекундной оптической накачкой. Явление обнаружено и исследовано посредством анализа сопровождающего его коллективного спонтанного излучения электрон-дырочных пар (суперфлюоресценции), наблюдавшегося на переходах между уровнями Ландау в GaAs/InGaAs-гетероструктуре размером 3×3 мм² с 15-ю квантовыми ямами в результате её помещения в сильное поперечное магнитное поле величиной 10–25 Тл и облучения 150-фемтосекундными лазерными импульсами с интенсивностью порядка 10 ГВт/см². Проведенные наблюдения указанной рекомбинационной суперфлюоресценции показали, что она отличается от обычной усиленной спонтанной люминесценции не только спектральными, но и угловыми характеристиками – ярко выраженной однонаправленностью излучения со случайной ориентацией оси диаграммы направленности в плоскости квантовых ям. Выявленные спектрально-угловые особенности излучения свидетельствуют о формировании и конкуренции горячих мод, которые существуют благодаря поляритонной дисперсии, вносимой созданной электрон-дырочной плазмой, направляются квантовыми ямами и обуславливают коллективное спонтанное излучение электрон-дырочных пар на частотах, отвечающих частотам переходов между несколькими низшими уровнями Ландау электронов и дырок. При этом плотность рекомбинирующей плазмы составляет $10^{12} - 10^{13}$ см⁻².

Полученный результат свидетельствует о возможности осуществления генерации фемтосекундных импульсов сверхизлучения при постоянной инжекционной накачке благодаря кооперативной рекомбинации свободных электронов и дырок в квантовых ямах, которые помещены в сильное магнитное поле, ориентированное перпендикулярно плоскости квантовых ям. В подобном сверхизлучающем полупроводниковом лазере на основе многослойной гетероструктуры, обладающей фактором оптического ограничения порядка 0,2 и находящейся в магнитном поле порядка 10–30 Тл, ожидается генерация квазипериодической либо хаотической последовательности когерентных импульсов с пиковой мощностью порядка 1 Вт, длительностью порядка 100 фс и скважностью порядка 10. Более того, в достаточно широком диапазоне мощностей накачки в нем возможна двухцветная сверхизлучательная генерация пары мод, резонансных двум соседним переходам между соответствующими электронными и дырочными уровнями Ландау [2]. Это обстоятельство открывает также возможность получения фемтосекундных импульсов терагерцового или дальнего ИК излучения за счет нелинейного внутрирезонаторного смешения указанных мод с использованием высокой квадратичной нелинейности полупроводника.

[1] A. A. Belyanin, V. V. Kocharovskiy, Vl. V. Kocharovskiy, *Quantum and Semiclassical Optics (JEOS, Part B)* **9**, 1 (1997); **10**, L13 (1998).

[2] А. А. Белянин, В. В. Кочаровский, Вл. В. Кочаровский, Д. С. Пестов, *Изв. ВУЗов. Радиофизика* **44**, 199 (2001); *Laser Physics* **13**, 161 (2003).

*) Эксперимент проведен в Национальной лаборатории сильных магнитных полей США (Университет штата Флорида) с участием американских ученых Jho Y.D., Wei X., Wang X., Reitze D. H., Kono J., Solomon G. S.

1.3. Опрокидывание продольного профиля и образование ударных фронтов сверхкоротких лазерных импульсов

Показано, что при самофокусировке сверхкоротких (субфемтосекундных) лазерных импульсов в диспергирующей нелинейной среде реализуется опережающий процесс опрокидывания продольного профиля импульса и образование ударных фронтов. Этот эффект приводит к аномальному уширению спектра излучения.

Авторы: А. А. Балакин, Н. А. Жарова, А. Г. Литвак, В. А. Миронов, С. А. Скобелев (ИПФ РАН).

Аннотация: Исследованы структурные особенности динамики самофокусировки импульсов с шириной спектра порядка центральной частоты. Описание процессов проведено в предположении безотражательного распространения волнового поля произвольной длительности в диспергирующей среде с кубичной нелинейностью. Развита методика качественного исследования динамики самовоздействия сверхкоротких импульсов. В частности, методом моментов найдено достаточное условие коллапса в системе. Использование преобразования автомодельного типа показало, что вблизи особенности дисперсионные эффекты ослабляются, и существенную роль играет нелинейная дисперсия среды (зависимость групповой скорости от амплитуды поля). Самофокусировка волнового поля сопровождается опрокидыванием продольного профиля импульса и в результате формируется особенность нового типа, в которой на фоне неограниченного роста поля происходит градиентная катастрофа. Численное исследование подтверждает, что самофокусировка сверхкоротких импульсов, как правило, сопровождается укрупнением продольного распределения и формированием ударных фронтов.

1.4. Механизм генерации крупномасштабного электрического поля

Разработан механизм генерации крупномасштабного электрического поля в двумерной атмосферной конвективной ячейке, обусловленный пространственным разделением захваченных в ячейке крупных и мелких противоположно заряженных гидрометеоров, с учетом влияния возникающего электрического поля на их движение. Предложенная модель позволяет объяснить пространственную структуру электрического поля в грозовом облаке, а также наблюдаемые на поверхности Земли знакопеременные квазипериодические вариации вертикальной компоненты поля на начальной и конечной стадиях грозы.

Авторы: Д. И. Иудин и В. Ю. Трахтенгерц (ИПФ РАН).

Аннотация. Получено самосогласованное решение для движения заряженной аэрозольной компоненты в двумерной конвективной ячейке с твердотельным вращением квазинейтральной в целом облачной среды. Конвекция препятствует выпаданию аэрозольных частиц (гидрометеоров) из ячейки под действием силы тяжести, и в то же время за счет краевых эффектов возникает поляризация ячейки с вращающимся электрическим полем, дающим вклад в переменную компоненту электрического поля на поверхности Земли. Учет влияния этого поля на движение гидрометеоров приводит по мере роста их радиуса и заряда к кардинальной перестройке пространственного заряда, в результате чего амплитуда электрического поля в ячейке растет, а вектор поля занимает стабильное вертикальное направление, соответствующее наблюдаемому полю на развитой стадии грозы. Указанный переход от осцилляций электрического поля к стационарному состоянию определяется критическим параметром $\delta = \Omega_p^2 / \Omega v$, где Ω_p^2 – квадрат

плазменной частоты аэрозольных частиц, ν – эффективная частота соударений аэрозолей с нейтралами, Ω – частота вращения газа в ячейке. На начальной и конечной фазах грозы $\delta < 1$, и возможны знакопеременные осцилляции электрического поля, при $\delta > 1$ электрическое поле большое по амплитуде и стабильное по направлению. Количественные оценки свидетельствуют о реальности предложенного механизма.

1.5. Квазиоптический антенный переключатель (дуплексер)

Предложен квазиоптический, в виде комбинации гофрированных зеркал, антенный переключатель (дуплексер), перспективный для мощных радаров высокого пространственного разрешения и дальней космической связи диапазона миллиметровых волн. Экспериментальный макет дуплексера с центральной частотой 94 ГГц имеет частотную полосу 18%, изоляция приемника от источника превышает 45 дБ.

Авторы: С. В. Кузиков, М. И. Петелин, Д. Ю. Щегольков (ИПФ РАН).

Аннотация. Дуплексер является неотъемлемой частью радаров и систем дальней микроволновой связи, использующих как для излучения, так и для приема сигнала одну и ту же антенну. С помощью дуплексера волновой поток от передатчика направляется в антенну, а сигнал, принятый антенной, направляется в приемник. Качество дуплексера характеризуется не только эффективностью реализации двух указанных функций, но и эффективностью подавления мощности, просачивающейся из передатчика в приемный канал. На относительно низких частотах и малых мощностях в качестве дуплексеров используются фарадеевские ферритовые циркуляторы. Однако в коротковолновой части диапазона СВЧ ферритовые устройства не в состоянии выдерживать большую мощность. По указанной причине в известном комплексе С-300 с радиолокатором на частоте 10 ГГц и в радиолокаторе «Руза», работающем на частоте 34 ГГц, используются дуплексеры на основе поляризационной развязки; излучаемая и принимаемая волны в обоих случаях обладают круговой поляризацией. На еще более высоких частотах – в диапазоне миллиметровых волн – дуплексеры с поляризационной развязкой целесообразно строить на основе металлических дифракционных гребенок – мало поглощающих СВЧ мощность и легко охлаждаемых. Принципиальными элементами дуплексера являются:

- поляризационный сепаратор – гребенка, направляющая падающую линейно поляризованную волну в одно из двух направлений в зависимости от того, является ли эта волна E - или H - поляризованной относительно гофрировки;
- поляризатор – гребенка, преобразующая линейную поляризацию в круговую и, наоборот, круговую поляризацию в линейную.

В варианте антенного дуплексера, разработанном в этом году в ИПФ РАН, относительная частотная полоса на половинном уровне мощности составила 18%, а изоляция приемника от источника оказалась свыше 45 дБ. Такого рода устройства представляются перспективными для будущих мощных радаров высокого пространственного разрешения и систем многоканальной космической связи.

1.6. Расчет частот переходов с учетом сверхтонкого расщепления вращательного спектра HCN

Из анализа всех имеющихся измерений вращательного спектра HCN в основном колебательном состоянии в несколько раз повышена точность расчета частот переходов с учетом сверхтонкого расщепления. Достигнутая точность в доплеровской шкале скоростей составила ≤ 0.3 м/с (1σ) для всех частот < 700 ГГц и лучше 2 м/с для частот < 1.5 ТГц.

Благодаря полученной точности, высокому содержанию HCN в межзвездной среде и возможности одновременных измерений нескольких сверхтонких компонент разной оптической толщины, линии HCN могут рассматриваться как один из лучших зондов для исследований динамики в областях звездообразования, а также как прецизионный стандарт при лабораторных измерениях.

Автор: А. В. Лапинов (ИПФ РАН).

Аннотация. Прецизионные частоты молекулярных радиолиний необходимы при исследованиях возбуждения молекул, переноса излучения, измерениях градиентов систематических скоростей в областях звездообразования, а также в качестве эталонных значений частот при спектральных измерениях в линиях других молекул не только в межзвездной среде [1, 2], но и в лаборатории [3]. Благодаря относительно высокому содержанию HCN в межзвездной среде, большому дипольному моменту (2.985D) и возможности наблюдать одновременно несколько сверхтонких компонент, данная молекула является одним из наиболее эффективных зондов для поиска и исследования коллапсирующих ядер в областях звездообразования. Очень часто наблюдаемые профили имеют асимметричную форму, сильно зависящую от разной оптической толщины в разных компонентах, и имеют вид, предсказанный ранее на основе детальных расчетов переноса излучения с учетом эффектов перекрытия [4]. Поскольку отношение компонент в переходе $J = 1 - 0$ также зависит от эффектов перекрытия верхних переходов, точное знание сверхтонкой структуры необходимо для корректной интерпретации наблюдаемых аномалий. В недавних исследованиях [5, 6] вращательного спектра HCN с использованием субдоплеровской спектроскопии для переходов от $J = 3-2$ до $J = 11-10$ была сделана попытка повышения точности молекулярных констант, описывающих вращательные частоты, и сделан вывод о зависимости eQq и CN от квантового числа J . К сожалению, авторами данных работ был допущен ряд методических ошибок в предположении о соотношении интенсивностей кросс-резонансов и их количестве, которые и привели к неправильным выводам. Выполненная нами обработка результатов данного эксперимента и других, имеющихся на сегодня, измерений позволила в несколько раз повысить точность B_0 и D_0 констант и не обнаружила статистически значимого изменения констант сверхтонкого расщепления от квантового числа J . При этом точность самих констант также оказалась в несколько раз лучше, чем в работах [5, 6] и в пределах статистической ошибки 1σ совпала с результатами молекулярных пучковых измерений для $J = 1$ [7]. Найденные нами константы гораздо лучше описывают измеренные частоты. Для всех частот < 700 ГГц достигнутая точность составила $\leq 10^{-9}$ (≤ 0.3 м/с в доплеровской шкале скоростей) и лучше 2 м/с для частот < 1.5 ТГц. Т.к. ранее нами было найдено, что молекулы HCN являются очень хорошим зондом для исследований динамики в областях звездообразования малой массы, с повышением точности частот возрастает надежность таких измерений и аккуратность расчетов переноса излучения с учетом эффектов перекрытия сверхтонких компонент спектра. Подобно другим, уже исследованным нами молекулам, спектр HCN также может использоваться в качестве прецизионного стандарта при измерениях линий других молекул.

1. G. Cazzoli, C. Puzzarini, and A. V. Lapinov 2003, ApJ 592, L95.
2. G. Cazzoli, C. Puzzarini, and A. V. Lapinov 2004, ApJ 611, 615.
3. G. Yu. Golubiatnikov, A. V. Lapinov, A. Guarnieri and R. Knöchel 2005, J. Mol. Spectrosc. 234, 190–194.
4. А. В. Лапинов 1989 Астрон. ж., 66, 264.
5. V. Ahrens, F. Lewen, S. Takano, G. Winnewisser, S. Urban, A. A. Negirev, and A. N. Koroliev 2002 Z. Naturforsch. A 57, 669 .
6. S. Thorwirth, H. S. P. Müller, F. Lewen, S. Brünken, V. Ahrens, and G. Winnewisser 2003 Ap. J. 585, L163.

1.7. Регистрация коррелированных изменений регионального и глобального масштабов аэроэлектрического поля

На основе непрерывных синхронных наблюдений аэроэлектрического поля на трех станциях, разнесенных на расстояния, превышающие высоту нейтральной атмосферы, впервые зарегистрированы коррелированные события регионального (прохождение холодных фронтов) и глобального (магнитная буря и Форбуш-понижение интенсивности космических лучей) масштабов на фоне действия локальных турбулентных, наблюдаемых по интенсивности короткопериодных флуктуаций электрического поля, и глобальных грозových, наблюдаемых по интенсивности электромагнитного шума в полосе частот $0.1 \div 30$ Гц, источников атмосферной электрической цепи.

Авторы: С. В. Анисимов, С. С. Бакастов, Н. М. Шихова (Институт физики Земли им О. Ю. Шмидта РАН), В. В. Клименко, Е. А. Мареев, Ю. В. Шлюгаев (ИПФ РАН).

Аннотация. Для исследования динамики глобальной атмосферной электрической цепи и механизмов воздействия солнечной активности на её состояние необходимы: унифицированные высокоточные измерения аэроэлектрического поля и тока на регионально разнесенных базах (расстояния, превышающие характерную высоту нейтральной атмосферы 100 км); измерения интегральной активности основных грозových генераторов; методики выделения глобальных, региональных и локальных возмущений поля и тока; обеспечение наблюдений геофизическими и метеорологическими данными. Такие комплексные синхронные наблюдения выполнялись в 2005–2006 гг. В качестве опорных пунктов были выбраны измерительный полигон Геофизической обсерватории "Борок" [$58^{\circ}04' \text{ N}$; $38^{\circ}14' \text{ E}$] и Гидрометеорологическая обсерватория Верхне-Волжского межрегионального территориального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Городец Нижегородской области [$56^{\circ}41' \text{ N}$; $43^{\circ}26' \text{ E}$]. Расстояние между пунктами «Борок» – «Городец» составляет около 370 км. Третий пункт аэроэлектрических наблюдений – станция «Прозорово» [$58^{\circ} 23' \text{ N}$; $37^{\circ} 39' \text{ E}$] – располагался на расстоянии около 70 км по направлению к северу от пункта «Борок». В результате непрерывных полевых аэроэлектрических наблюдений, дистанционной регистрации молниевой активности в основных планетарных грозových очагах, а также экспресс обработки полученных амплитудно-временных рядов сформирован уникальный банк данных, характеризующий состояние аэроэлектрического поля в пунктах наблюдений в конвективные периоды 2005–2006 гг.

В результате наблюдений и экспресс анализа данных обнаружены коррелированные события регионального (прохождение холодных фронтов) и глобального (магнитная буря и Форбуш-понижение интенсивности космических лучей) масштабов на фоне действия локальных турбулентных и глобальных грозových источников атмосферной электрической цепи.

По наблюдениям на трех точках 30–31 июля 2006 года зарегистрировано возмущение аэроэлектрического поля регионального масштаба, связанное с прохождением холодных фронтов. Кросс-корреляционная функция для станций «Борок» – «Городец» достигала 0,62 при временном сдвиге 455 мин, совпадающим с временем распространения холодного фронта по данным региональных метеорологических наблюдений.

В качестве события глобального масштаба детально проанализировано возмущение геоэлектромагнитного поля 19 августа 2006 года. Анализ изменений Кр-индекса по данным Национального Геофизического центра данных (NGDC) показал, что для интервала времени с 15UT 19 августа по 06UT 20 августа значения этого показателя

достигали 6. По данным магнитных наблюдений среднеширотной Геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН 19.09.2006 г. около 10 час 45 мин UT зарегистрировано начало магнитной бури, характеризующейся значительными вариациями компонент магнитного поля в пределах последующего 28-часового промежутка. На 19 августа 2006 г. приходится значительное Форбуш – понижение интенсивности галактических космических лучей с магнитудой 5%. Результаты кросс-корреляционного анализа показывают одновременное действие внешнего источника электрического поля, влияющего на аэроэлектрическое состояние нижней атмосферы в регионе наблюдений. Кросс-корреляционная функция 28-часовых амплитудно-временных рядов напряженности поля в пунктах «Прозорово» и «Городец» достигает величины 0.49; для пунктов «Борок» – «Прозорово» максимум кросс-корреляционной функции равен 0.52.

1.8. Модель для электрического поля М-компоненты в канале молниевой вспышки

Установлена важная роль динамики канала молниевой вспышки (так называемой М-компоненты) в инициации высотных разрядов в мезосфере - спрайтов и гало. Развита аналитическая модель для электрического поля М-компоненты, и проведены численные расчеты с использованием ночного профиля проводимости, модифицируемого нагревом электронов. Наблюдаемые пространственно-временные характеристики диффузных свечений (гало) на высотах 75–85 км и спрайтов могут быть объяснены возмущениями поля на стадии непрерывного тока и М-компоненты молнии.

Авторы: Е. А. Мареев, С. А. Яшунин (ИПФ РАН), V. A. Rakov (Department of Electrical and Computer Engineering, University of Florida, Gainesville, Florida, USA).

Аннотация. Рассмотрена роль динамики молниевой вспышки в инициации высотных разрядов в мезосфере – спрайтов и гало. Детально проанализирована так называемая М-компонента молниевой вспышки, характеризующаяся резким увеличением интенсивности свечения канала и распространением волны тока вдоль канала молнии на стадии непрерывного тока, амплитуда которого, как показывают наблюдения, особенно велика для положительных вспышек облако-земля. В результате М-компонента ускоряет рост поля на стадии непрерывного тока. Развита аналитическая модель, позволяющая рассчитать возмущение электрического поля, создаваемого стадией М-компоненты молнии. Для учёта влияния проводимости на электрическое поле проведены численные расчеты с использованием ночного профиля проводимости. Установлено, что М-компонента приводит к возрастанию электрического поля на больших высотах и превышению порога пробоя в мезосфере. Найдено условие, при котором максимум полного электрического поля достигается под углом к оси системы, определяемым параметром $a = \frac{z^2 \ddot{d}}{Pc^2}$, где z – длина канала молнии, \ddot{d} – вторая производная дипольного момента вспышки, P – полный дипольный момент на стадии постоянного тока в момент максимума тока М-компоненты, c – скорость света. Показано, что М-компонента расширяет область, занятую электрическим полем в горизонтальном направлении, что приводит к повышению вероятности возникновения спрайтов, удалённых от оси канала молниевой вспышки, которые часто наблюдаются в экспериментах.

1.9. Лабораторное исследование теплового нелинейного взаимодействия плазмы с ленгмюровскими волнами

В лабораторном эксперименте продемонстрировано возникновение узкой,

вытянутой вдоль внешнего магнитного поля неоднородности концентрации плазмы, формирующейся в ходе теплового нелинейного взаимодействия с ленгмюровскими волнами. Показано, что формирование подобной неоднородности сопровождается эффективным захватом и волноводным распространением ленгмюровских волн; продемонстрировано аномальное затухание захваченных волн на гармониках электронной гирочастоты. Результаты данных лабораторных экспериментов проясняют физические процессы, развивающиеся в ионосфере Земли при воздействии на нее мощным радиоизлучением.

Авторы: М. В. Стародубцев, В. В. Назаров, А. В. Костров (ИПФ РАН).

Аннотация. Мелкомасштабная искусственная ионосферная турбулентность является одним из наиболее важных эффектов, наблюдающихся в ходе активных экспериментов по нагреву ионосферы Земли мощным радиоизлучением. Данная турбулентность развивается при отражении в ионосфере мощной радиоволны обыкновенной поляризации и характеризуется формированием узких, вытянутых вдоль геомагнитного поля неоднородностей концентрации с характерными поперечными размерами порядка нескольких метров. С подобным расслоением ионосферной плазмы непосредственно связаны такие нелинейные явления, развивающиеся в нагретой области ионосферы, как аномальное ослабление падающих радиоволн и искусственное радиоизлучение ионосферы. Исследование механизмов мелкомасштабного расслоения ионосферной плазмы проводилось в ИПФ РАН путем лабораторного моделирования процессов взаимодействия волновых полей с ионосферой. Было показано, что мелкомасштабное расслоение плазмы, сходное с наблюдаемым в ходе нагревных экспериментов, может возникать при нелинейном взаимодействии коротковолновых плазменных колебаний с магнитоактивной плазмой. В процессе данного нелинейного взаимодействия в плазме формируется узкая, вытянутая вдоль внешнего магнитного поля неоднородность с пониженной концентрацией и происходит эффективный захват плазменных колебаний в объеме неоднородности. Поглощение захваченной плазменной волны вызывает локальный нагрев неоднородности и ее углубление вследствие термодиффузионного перераспределения плазмы. Показано, что подобное нелинейное взаимодействие развивается исключительно в окрестности плазменного резонанса при превышении порога тепловой нелинейности. Отмечено понижение порога нелинейности при наличии в плазме затравочных неоднородностей. Продемонстрирован эффект циклотронного поглощения захваченных плазменных волн на гармониках электронной гирочастоты. Эффект нелинейного захвата плазменных волн и их эффективное поглощение в объеме неоднородности важны для объяснения явления аномального поглощения падающего радиоизлучения в ходе нагревных экспериментов в ионосфере. Захваченные плазменные колебания могут вносить существенный вклад и в формирование некоторых спектральных компонент искусственного радиоизлучения ионосферы.

1.10. Новые способы повышения эффективности квазиоптических устройств, работающих на эффекте Тальбота

Предложены способы повышения эффективности широкого класса квазиоптических устройств, работающих на эффекте Тальбота. Способы основаны на коррекции спектра постоянных распространении мод в волноводе путем оптимизации граничных условий или формы его поперечного сечения.

Авторы: К. А. Федорова, Г. Г. Денисов, С. В. Кузиков, Ю. Ю. Данилов, М. Е. Плоткин, М. Ю. Шмелёв (ИПФ РАН).

Аннотация. Параксиальный волновой пучок при его распространении и дифракции в сверхразмерном волноводе может повторить свою пространственную структуру в определенном сечении волновода, может быть разделен на несколько одинаковых пучков; а интерференция нескольких пучков также производит весьма интересные пространственные структуры [1–4]. В последние годы разнообразные квазиоптические устройства, основанные на этом эффекте, разработаны и успешно использованы в различных системах. Можно отметить резонатор для лазера на свободных электронах [2], антенну дистанционного управления сканированием микроволнового пучка в плазменных установках [3], а также другие приложения [4].

Указанные явления обусловлены пропорциональностью длин биений различных волноводных мод, что выполняется в реальных волноводах с конечной точностью и сильно нарушается при увеличении углового спектра волновых пучков. В настоящей работе показано, что в результате оптимизации граничного условия на стенке волновода или его поперечного сечения эффективность устройств может быть существенно повышена за счет коррекции всей совокупности волновых чисел используемых мод. При этом, например, дифракционные потери в резонаторе лазера на свободных электронах могут быть уменьшены в несколько раз, а диапазон углового сканирования антенны для токамака ИТЭР расширен с 14 до 22 градусов, что является принципиальным улучшением антенны.

1. L. Rivlin, A. Semenov. “Transition of images through optical waveguides”, *Laser Focus*, vol. 17, №2, p. 82–84, February 1981.

2. A. G. A. Verhoeven et al. “First mm-wave generation in the FOM free electron maser”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 27, №4, p. 1084–1091, August 1999.

3. W. Kasperek et al. “Performance of a remotely steering antenna for ECRH/ECCD applications in ITER using a four-wall corrugated square waveguide”, *Nuclear Fusion*, vol. 43, p. 1505–1512, November 2003.

4. G. G. Denisov, S. V. Kuzikov, “Microwave systems based on controllable interference of paraxial wavebeams in oversized waveguides”, in *Strong Microwaves in Plasmas*, vol. II, ed. by A.G. Litvak. Nizhny Novgorod, 2000, p. 960–966.

1.11. Генерация СВЧ излучения в терагерцовом диапазоне 0.8–1 ТГц

В гиротроне с импульсным магнитом 40 Т получена генерация СВЧ излучения в терагерцовом диапазоне: 0.8–1 ТГц. Мощность излучения составила несколько сотен ватт при длительности импульса 40 мкс.

Авторы: М. Ю. Глявин, А. Г. Лучинин (ИПФ РАН).

Аннотация. Выполнены расчет, конструирование и изготовление пакетированного гиротрона с работающим в импульсном режиме соленоидом. Получение в режиме повторяющихся импульсов магнитного поля порядка 40 Тесла, необходимого для генерации излучения терагерцового диапазона на основной гармонике гирочастоты, обеспечивается следующими конструктивными особенностями соленоида:

– с целью достижения максимальной энергетической эффективности токопроводящая жила соленоида намотана непосредственно на корпус гиротрона,

– с целью повышения механической прочности конструкции намотка осуществлена композитным кабелем; центральная жила из сплава Nb-60%Ti механически армирует наружную медную оболочку кабеля.

– для уменьшения омических потерь, увеличения механической прочности и термостабилизации в качестве пассивного хладагента используется жидкий азот.

Получена генерация СВЧ излучения в частотном диапазоне 0.8–1.0 ТГц. Длительность импульса составляла около 40 мкс при уровне мощности порядка нескольких сотен ватт. Частота следования СВЧ импульсов ограничивается возможностями охлаждения соленоида и составляет примерно 1 импульс в минуту, что более чем на порядок превышает известные зарубежные аналоги. В перспективе, использование активного азотного охлаждения может позволить существенно увеличить частоту повторения импульсов.

1.12. Многочастотный гиротрон с широкополосной электродинамической системой

Успешно испытан макет многочастотного гиротрона с принципиально новой синтезированной широкополосной электродинамической системой. В диапазоне 100–150 ГГц продемонстрирована возможность получения мощности более 1 МВт на 6 частотах при дифракционных потерях внутри лампы менее 2%. Результат является основой для разработки промышленного многочастотного гиротрона.

Авторы: А. В. Чирков, Г. Г. Денисов, А. Н. Куфтин, В. Е. Запезалов (ИПФ РАН), а также ЗАО НПП «ГИКОМ».

Аннотация. В существующих установках и разрабатываемом международном проекте токамака ITER для системы электронно-циклотронных волн выбраны фиксированные частоты, которые являются компромиссом между поглощением в центральных и периферических областях плазмы. Эти система может быть значительно эффективнее, если в используемых гиротронах будет возможна перестройка частоты или, другими словами, генерация различных мод при изменении основного магнитного поля прибора.

Для создания многочастотного мегаваттного гиротрона необходимо решить следующие ключевые задачи: 1) обеспечить возможность эффективного и селективного взаимодействия мощного винтового электронного потока с несколькими выбранными модами резонатора гиротрона; 2) разработать квазиоптический преобразователь рабочих мод в Гауссовы волновые пучки, причем допустимый уровень дифракционных потерь не должен превышать нескольких процентов от генерируемой мощности в широкой полосе частот; 3) разработать широкополосное или перестраиваемое выходное окно.

На основе скалярного подхода, были разработаны быстрые методы анализа и синтеза поля бегущей волны в цилиндрическом сверхразмерном волноводе с плавной и неглубокой деформацией стенок с учетом дифракции на несимметричном конце волновода. Новые методы позволили синтезировать излучатель, более короткий и, как следствие, более широкополосный, по сравнению с известными. Решение оконной проблемы выходило за рамки проведенного эксперимента, в котором использовалось кварцевое Брюстеровское окно.

В диапазоне 105–152 ГГц была продемонстрирована возможность получения мощности более 1 МВт в короткоимпульсном (100 мкс) прототипе на 6 частотах при дифракционных потерях внутри лампы менее 2%. Результат является основой для разработки промышленного многочастотного гиротрона.