

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

1. Отделение физики плазмы и электроники больших мощностей

1.1. Получено непосредственное экспериментальное подтверждение существенности нетеплового воздействия микроволнового электромагнитного поля на массоперенос в твердой фазе. Экспериментально обнаружена анизотропия пор в керамике на основе оксида циркония, спекаемой при нагреве линейно поляризованным микроволновым излучением. Данный результат находится в согласии с разработанной авторами моделью усредненного пондеромоторного воздействия высокочастотного поля на заряженные вакансии в ионных кристаллах, из которой следует, что сферическая пора одноосно сжимается вдоль направления вектора электрического поля.

Авторы: К.И. Рыбаков, В.Е. Семенов (ИПФ РАН), G. Link, M. Thumm (Institute for Pulsed Power and Microwave Technology, Карлсруэ, Германия).

Аннотация. Высокотемпературная микроволновая обработка является перспективным направлением в создании новых материалов. Применение микроволнового нагрева позволяет ускорить протекание таких процессов, как спекание и соединение керамических материалов, отжиг имплантированных полупроводниковых структур и др. Особую важность в исследованиях в области микроволновой обработки материалов имеет проблема нетеплового воздействия микроволнового электромагнитного поля на процессы массопереноса в твердой фазе. Имеются многочисленные экспериментальные свидетельства существенной роли нетепловых микроволновых эффектов в процессах высокотемпературной обработки материалов. Однако для реализации возможности целенаправленного использования этих эффектов необходимо охарактеризовать конкретный механизм, посредством которого при микроволновом нагреве неравновесные возмущения с весьма низким энергосодержанием воздействуют на процессы массопереноса.

В предыдущих работах авторов из Института прикладной физики РАН [1–4] предложена и обоснована модель усредненного пондеромоторного воздействия микроволнового излучения на потоки заряженных вакансий в ионных кристаллических материалах. Согласно этой модели, нелинейное взаимодействие микроволнового электромагнитного поля с возмущениями концентрации вакансий вблизи структурных неоднородностей в твердом теле может приводить к пластическому течению, направление которого связано с направлением поляризации излучения.

В данной работе [5] модель усредненного пондеромоторного воздействия применена для описания эволюции сферической поры в ионном кристалле при его микроволновом нагреве. Показано, что сферическая пора одноосно сжимается вдоль направления вектора электрического поля. Эффект сжатия пор обнаружен экспериментально в керамике на основе наноразмерного порошка оксида циркония, спекаемой при нагреве линейно поляризованным микроволновым излучением. В рамках сравнительных исследований установлено, что при микроволновом нагреве поры в керамике имеют вытянутую форму и преимущественно ориентированы перпендикулярно вектору электрического поля, в то время как при традиционном нагреве форма пор незначительно отличается от сферической и преимущественной ориентации не наблюдается.

Таким образом, получено непосредственное экспериментальное подтверждение реализации пондеромоторного механизма нетеплового микроволнового воздействия на массоперенос в твердой фазе. Данный результат открывает возможность создания новых методов высокотемпературной микроволновой обработки материалов, целенаправленно использующих эффекты нетеплового воздействия для создания материалов с новыми свойствами.

1. K.I. Rybakov, V.E. Semenov. Possibility of plastic deformation of an ionic crystal due to the nonthermal influence of a high-frequency electric field. // *Phys. Rev. B*. 1994. V. 49. No. 1. P. 64-68.
2. K.I. Rybakov, V.E. Semenov. Mass transport in ionic crystals induced by the ponderomotive action of high-frequency electric field. // *Phys. Rev. B*. 1995. V. 52. No. 5. P. 3030-3033.
3. K.I. Rybakov, V.E. Semenov, S.A. Freeman, J.H. Booske, R.F. Cooper. Dynamics of microwave-induced currents in ionic crystals. // *Phys. Rev. B*. 1997. V. 55, № 6. P. 3559-3567.
4. J.H. Booske, R.F. Cooper, S.A. Freeman, K.I. Rybakov, V.E. Semenov. Microwave ponderomotive forces in solid state ionic plasmas. // *Phys. Plasmas*. 1998. V. 5, № 5. P. 1664-1670.
5. K.I. Rybakov, V.E. Semenov, G. Link, and M. Thumm. Preferred orientation of pores in ceramics under heating by a linearly polarized microwave field. // *J. Appl. Phys.* 2007. V. 101. Art. No. 084915.

1.2. Найден спектр электромагнитного излучения ультрарелятивистских электронов, совершающих бетатронные колебания в плазменном поле лазерного ускорителя, в квантовом режиме, когда энергия электронов близка к энергии излучаемых фотонов. Получено выражение для вероятности образования электрон - позитронных пар энергичным фотоном в сильном плазменном поле. Показано, что радиационные потери ультрарелятивистских электронов в лазерном ускорителе в квантовом режиме пропорциональны энергии электрона в степени $2/3$, в то время как в классическом режиме (энергия излучаемого фотона пренебрежимо мала по отношению к энергии электрона) потери растут как квадрат энергии электрона. Исследованные квантовые эффекты будут играть существенную роль в следующем поколении плазменных ускорителей.

Авторы: И. Костюков, Е. Неруш (ИПФ РАН).

Аннотация. Распространение сверхмощных лазерных импульсов в плотной плазме приводит к генерации сверхсильных электромагнитных полей. Такие плазменные поля могут быть использованы для ускорения электронов и генерации жесткого электромагнитного излучения. В последнее время наблюдается впечатляющий прогресс в плазменных методах ускорения заряженных частиц. В 2006 г. в лазерной плазме удалось сгенерировать квазимоноэнергетические электронные пучки с энергией около 1 ГэВ. В связи с разработкой в мировых научных центрах петаваттных лазерных систем (в том числе и в ИПФ РАН) ожидается, что удастся достичь гораздо более высокой энергии ускоренных электронов. Следует отметить, что при ускорении в плазменном поле электроны совершают бетатронные колебания (в поперечном к ускорению направлении), что приводит к генерации жесткого электромагнитного излучения. При большой энергии электронов и сильном плазменном поле излучение фотонов происходит в квантовом режиме, поскольку энергия излучаемого фотона становится близка к энергии электрона. Кроме этого энергичный фотон может распасться в сильном плазменном поле на электрон-позитронную пару.

Исследованы квантовые эффекты, сопровождающие ускорение релятивистских электронов в сильно нелинейной плазменной волне, образованной мощным лазерным импульсом. Вычислен спектр электромагнитного излучения ультрарелятивистских электронов, ускоряемых в сильном плазменном поле в квантовом режиме. Получено выражение для вероятности образования электрон-позитронных пар энергичным фотоном в сильном плазменном поле. Радиационные потери в плазменном ускорителе в квантовом режиме пропорциональны энергии электрона в степени $2/3$, в то время как в классическом режиме, потери растут как квадрат энергии электрона. Показано, что сильные плазменные поля являются эффективным источником энергичных электронов, позитронов и квантов электромагнитного поля.

1. Nerush E., Kostyukov I. // Phys. Rev. E. 75, 057401 (2007).

1.3. Создан переключатель фазы мощных волновых пучков на частоту 30 ГГц на основе диска из высокочистого кремния, переключаемого в режим проводимости импульсами Ti:Sa лазера с энергией 5–10 мДж. На низком уровне мощности продемонстрировано эффективное переключение фазы на 180° за время, составляющее несколько наносекунд.

Авторы: А. А. Вихарев, Г. Г. Денисов, Вл. В. Кочаровский, С. В. Кузиков, М. Л. Кулыгин, В. В. Паршин, Н. Ю. Песков, А. Н. Степанов, Д. И. Соболев, М. Ю. Шмелёв (ИПФ РАН).

Аннотация. Предложен квазиоптический коммутатор мощного СВЧ излучения, активный элемент которого представляет собой металлическое зеркало с помещенной на его поверхность пластиной полупроводника. Переключение фазы волнового пучка достигается за счет создания в полупроводнике проводящего слоя лазерным излучением с энергией кванта, примерно равной ширине запрещенной зоны. С использованием диска из высокочистого допированного золотом кремния ($\tan\delta=10^{-5} - 10^{-6}$ на 30 ГГц при 290 К), облучаемого импульсным титан-сапфировым лазером, проведено исследование 180° -ого переключателя фазы гауссова волнового пучка на частоте 30 ГГц. На низком уровне СВЧ мощности показано эффективное переключение фазы пучка за время, составляющее несколько наносекунд. Проведенный эксперимент показал возможность эффективной (с точки зрения задач компрессии импульсов) коммутации фазы СВЧ импульсов длительностью $10^2 - 10^3$ нс при помощи дисков кремния, облучаемых лазерными импульсами с энергией 5–0 мДж. Тестирование коммутатора на высоком уровне СВЧ мощности (~ 100 МВт) планируется провести на стенде STF3 в ЦЕРНе на мощном компрессоре импульсов SLED-II, созданном в сотрудничестве с ИПФ РАН.

Публикации

1. А.А. Вихарев, Г.Г. Денисов, Вл.В. Кочаровский, С.В. Кузиков, В.В. Паршин, Н.Ю. Песков, А.Н. Степанов, Д.И. Соболев, М.Ю. Шмелев. Быстродействующий квазиоптический переключатель фазы волнового пучка, основанный на эффекте индуцированной фотопроводимости в кремнии. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, вып. 17. С. 38-45.

2. G.G. Denisov, V.I.V.Kocharovsky, S.V.Kuzikov, V.V.Parshin, N.Yu.Peskov, A.N.Stepanov, D.I.Sobolev, M.Yu.Shmelyov, I.Syratchev. Fast Quasi-Optical Phase Shifter Based on Induced Photoconductivity in Silicon. Conference Digest of the Joint 32nd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 15th International Conference on Terahertz Electronics, Cardiff, UK, 2007. V. 2, p. 795-796.

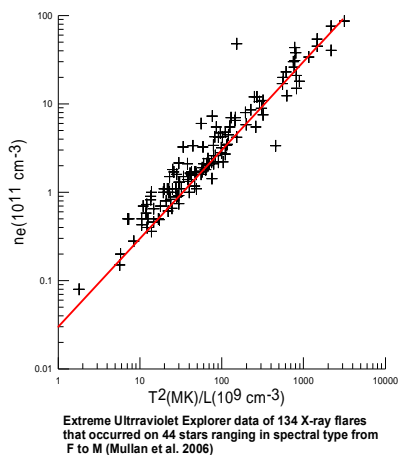
3. А.А. Вихарев, Г.Г. Денисов, Вл.В. Кочаровский, С.В.Кузиков, В.В. Паршин, Н.Ю. Песков, А.Н. Степанов, Д.И. Соболев, М.Ю. Шмелёв Быстродействующий квазиоптический фазовращатель, основанный на эффекте индуцированной фотопроводимости в кремнии // Известия ВУЗов. Радиофизика (в печати).

1.4. Установлена определяющая роль фотосферной конвекции в возникновении горячих рентгеновских петель в звездных атмосферах. Показано, что фотосферная конвекция генерирует мощные электрические токи в основаниях магнитных петель, диссипация которых приводит к нагреву плазмы до температур $(1-5)\times 10^7 K$, если скорость конвективного потока превышает пороговое значение, определяемое радиационными потерями. При этом температура плазмы растет с увеличением скорости конвекции, что объясняет существование более горячих корон у звезд поздних спектральных классов, отличающихся от Солнца существенно более развитыми конвективными зонами.

Полученное соотношение между температурой, давлением плазмы и длиной горячих рентгеновских петель хорошо подтверждается данными спутника *Extreme Ultraviolet Explorer* о параметрах рентгеновских источников на 44 звездах спектральных типов от *F* до *M*.

Авторы: В.В. Зайцев, А.А. Круглов (Институт прикладной физики РАН).

Аннотация. Исследован нагрев плазмы в магнитных петлях, сформированных сходящимися потоками фотосферной плазмы в узлах нескольких ячеек супергрануляции или на границах соседних супергранул. В таких петлях генерируются мощные (до 10^{12} – 10^{13} А) электрические токи, диссипация которых приводит к эффективному нагреву плазмы. При этом основным каналом диссипации является проводимость Каулинга, связанная с ионно-атомными столкновениями в замагниченной плазме и обусловленная наличием в плазме небольшого (порядка 10^{-5} по массе) количества нейтралов. Нагрев имеет пороговый характер, связанный с потерями на оптическое и рентгеновское излучение, и возникает при скоростях конвекции, превышающих приблизительно 350 м с^{-1} . Источник нагрева сосредоточен в основаниях петли в интервале высот 100–500 км, где происходит увеличение температуры до значений порядка 5–50 МК. При этом температура плазмы растет с увеличением скорости конвекции, что объясняет существование значительно более горячих корон у звезд поздних спектральных классов по сравнению с короной Солнца. Как известно, звезды поздних спектральных классов отличаются от Солнца более развитыми конвективными зонами и существенно большими скоростями фотосферной конвекции. Полученная зависимость между размером горячих рентгеновских петель, а также температурой и концентрацией заключенной в них плазмы подтверждается экспериментальными данными о рентгеновских источниках на активных звездах, полученными с помощью спутника *Extreme Ultraviolet Explorer* (Mullan et al., 2006).



На рисунке крестиками указаны экспериментальные данные о 134 рентгеновских магнитных петлях на 44 звездах спектральных типов от *F* до *M*. Сплошная линия – теория.

Публикации

1. В.В. Зайцев, А.А. Круглов. Горячие рентгеновские петли в звездных атмосферах // Письма в *Астрономический журн.* 2007 (в печати); Труды Всероссийской конференции по астрономии, 2007, г. Санкт-Петербург, с. 58.
2. В.В. Зайцев, К. Шибасаки, О механизме нагрева плазмы в корональных магнитных петлях // *Астрономический журн.* 2005. Т. 82, № 12, с. 1127-1136.
3. V.V. Zaitsev, M.L. Khodachenko. Formation of intensive magnetic flux tubes in a converging flow of partially ionized solar photospheric plasma // *Astrophys. Space Sci.* V. 279, p. 389-410, 2002.

1.5. Предложен новый квазиоптический метод расчета электромагнитных волновых пучков, распространяющихся в горячей магнитоактивной плазме установок УТС с магнитным удержанием. Разработанный на его основе численный код позволяет корректно учесть влияние рефракционных, дифракционных и диссипативных эффектов на структуру области энергоснабжения, что очень важно при решении задач подавления неустойчивости плазмы в токамаках нового поколения и, в частности, ITER.

Авторы: А. А. Балакин, М. А. Балакина, Г. В. Пермитин, А. И. Смирнов (ИПФ РАН).

Аннотация. До сих пор не существует последовательных методов описания волновых полей в неоднородных средах с существенным поглощением. Как правило, волновой пучок или пакет рассчитываются (в приближении геометрической оптики или безабберационной квазиоптики) в пренебрежении диссипацией энергии, а затем ищется функция ослабления поля вдоль невозмущенной трассы распространения. При этом игнорируется влияние неоднородного поглощения на рефракцию и дифракцию пучка.

Предлагаемый подход к решению данной проблемы основан на использовании укороченного квазиоптического уравнения для электромагнитных волн в неоднородной горячей (с пространственной дисперсией) магнитоактивной плазме с поглощением. Уравнение записывается в ортогональной криволинейной системе координат, в качестве опорной траектории которой выбирается луч в среде без поглощения. Редукция уравнений Максвелла производится по продольной к этому лучу координате, а влияние диссипации учитывается дифференциальными операторами по поперечным координатам.

Описанный способ приемлем до тех пор, пока смещение пучка от опорной траектории из-за поглощения не очень велико (меньше радиуса кривизны опорного луча и масштабов неоднородности среды) и его угловой спектр остается узким. В рамках такого приближения можно учесть эффекты, связанные с неоднородностью поглощения (и в координатном пространстве, и в пространстве волновых векторов), как дополнительная рефракция (уход пучка от опорной траектории, фокусировка или дефокусировка), обужение или уширение углового спектра, влияющие на дифракцию пучка. Неучтенными остаются эффекты рассеяния под большими углами и трансформация пучка в другие квазинормальные моды.

На основе полученного уравнения разработан код для расчета волновых пучков СВЧ диапазона, позволяющий корректно определить область основного энерговклада в плазме установок УТС с магнитным удержанием. Код проверен на эталонных плазменных слоях, допускающих строгое решение уравнений Максвелла для полей волновых пучков.

Приложение кода к расчету нагрева плазмы в токамаке ITER показало важность учитываемых эффектов для задачи стабилизации так называемой «тиринг-моды» посредством локального нагрева потенциально опасного для развития неустойчивости «магнитного острова».

Публикации

1. А.А. Балакин, М.А. Балакина, А.И. Смирнов, Г.В. Пермитин. Скалярное уравнение для волновых пучков в магнитоактивной плазме // *Физика плазмы*, **33**, 337-345 (2007).
2. А.А. Balakin, М.А. Balakina, А.И. Smirnov, G.V. Permitin. Quasi-optical description of wave beams in smoothly inhomogeneous anisotropic media // *J. Physics D: Applied Physics*, **40**, 4285-4296 (2007).
2. А.А. Балакин, М.А. Балакина, А.И. Смирнов, Г.В. Пермитин. Волновые пучки в неоднородных анизотропных и гиротропных средах // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. **51** №12 (2007).
4. А.А. Балакин, М.А. Балакина, А.И. Смирнов, Г.В. Пермитин. Влияние диссипации на распространение волновых пучков в неоднородных анизотропных и гиротропных средах // *Физика плазмы* (принята в печать).

1.6. Для стабилизации плазмы в тороидальных магнитных ловушках, включая ИТЕР, предложен метод адаптивного сканирования суммарного волнового пучка, генерируемого комплексом гиротронов, частоты которых управляются напряжениями. Элемент коммутатора, квазиоптический диплексер, испытан с использованием гиротрона, генерировавшего 0.5 МВт на частоте около 140 ГГц; переключение пучка между выходными каналами производилось в течение десяти микросекунд.

Авторы: А.Г. Литвак, М.И. Петелин, Д.Ю. Щегольков (ИПФ РАН), W. Kasperek (IPP, Stuttgart), V. Erckmann (IPP, Greifswald), M. Thumm (ZFK, Karlsruhe).

Аннотация. Разработан метод быстрого адаптивного частотного сканирования волновых пучков, основанный на использовании квазиоптических резонансных мультиплексеров. Эксперименты проводились на стендах ИПФ РАН, Нижегородского университета, Штутгартского университета и Института физики плазмы в Грайфсвальде. Продемонстрировано переключение волнового пучка, генерируемого 140 ГГц гиротроном с импульсной мощностью порядка 0.5 МВт. Модуляцией напряжения на гиротроне пучок переключался с одного выходного канала на другой с частотой до 10 кГц.

Метод быстрого сканирования волнового пучка планируется использовать совместно с IPP, Garching; IPP, Stuttgart University; Max Planck IPP, Greifswald; ENEA, Frascati; KFK, Karlsruhe, для подавления гидродинамических неустойчивостей плазмы в действующих установках управляемого термоядерного синтеза: ASDEX-Upgrade и FTU.

В случае успешной демонстрации на современных токамаках этот метод будет предложен для использования в международном УТС реакторе ИТЕР.

Публикации

1. Kasperek W., Petelin M., Shchegolkov D., Erckmann V., Plaum B., Bruschi A. ECRH groups at IPP Greifswald, FZK Karlsruhe, and IPF Stuttgart, *FaDiS, a Fast Switch and Combiner for High-power Millimetre Wave Beams*, accepted for publication in Fusion Science.

2. Kasperek W., Petelin M., Erckmann V., Shchegolkov D., Bruschi A., Cirant S., Litvak A., Thumm M., Plaum B., Grünert M., Malthaner M., *Fast Switching and Power Combination of High-Power Electron Cyclotron Wave Beams: Principles, Numerical Results and Experiments*, Fusion Science and Technology. 2007. V. 52. AUG.

3. Kasperek W., Petelin M., Erckmann V., Shchegolkov D., Bruschi A., Cirant S., Thumm M., Plaum B., Grünert M., Malthaner M. *Fast Switching of High-Power Millimetre Waves Between Two Launchers: Concepts, Numerical Investigations and First Experiments*, EC-14 Proceedings, 2006. <http://www.hellasfusion.gr/englishver/ec14conference.php>

4. V. Erckmann, V.N. Gorbatushkov, J.L. Hirshfield, W. Kasperek, Yu.I. Koshurinov, V.G. Pavelyev, M.I. Petelin, D.Yu. Shchegol'kov, I.V. Turchin. *Control of quasi-optical beams by grating based devices*, Proc. of the 6th International Workshop "Strong Microwaves in Plasmas", Nizhny Novgorod: IAP, 2006. V. 1, p. 251-255.

5. Ю.И. Кошуринов, В.Г. Павельев, М.И. Петелин, И.В. Турчин, Д.Ю. Щегольков. Диплексер на основе открытого резонатора с гофрированными зеркалами // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, вып. 16, с. 73-79. <http://www.ioffe.ru/journals/pjtf/2005/16/p73-79.pdf>

1.7. Показана возможность создания мощных импульсных источников излучения терагерцового диапазона частот на основе плазменных магнито-компрессионных мазеров. Найдены условия, при которых магнитное адиабатическое сжатие плазмы в прямой магнитной ловушке сопровождается накоплением значительной энергии в горячей анизотропной электронной компоненте с последующим быстрым сбросом энергии в виде импульса стимулированного электромагнитного излучения (с характерной мощностью

100 МВт, частотой 1 ТГц и длительностью импульса 100 нс) в результате развития электронно-циклотронной неустойчивости быстрых необыкновенных волн, распространяющихся поперек оси ловушки.

Авторы: С.В. Голубев, А.Г. Шалашов (ИПФ РАН).

Аннотация. Исследованы режимы магнитного сжатия двухкомпонентной неравновесной плазмы в прямой магнитной ловушке, при которых адиабатическое увеличение магнитного поля сопровождается накоплением значительной энергии в горячей анизотропной электронной компоненте с последующим сбросом накопленной энергии в виде импульса стимулированного электромагнитного излучения в результате развития электронно-циклотронных неустойчивостей. Проанализированы основные типы неустойчивостей и найдены параметры импульса излучения на нелинейной стадии. Показана возможность создания нового класса мощных импульсных источников излучения терагерцового диапазона частот с использованием магнитного сжатия плазмы. Мощность таких источников составляет десятки МВт при использовании плазмы ЭЦР разряда с плотностью основной компоненты около 10^{13} см⁻³ и может достигать ГВт уровня при переходе к более плотной плазме.

Публикации

1. С.В. Голубев, А.Г. Шалашов. Мазер на циклотронном резонансе с адиабатической магнитной накачкой в разреженной плазме // Письма в ЖЭТФ, том 86, вып. 2, с. 98-105 (2007).

2. S.V. Golubev, A.G. Shalashov. Cyclotron resonance maser driven by magnetic compression of rarefied plasma // to be published in Phys. Rev. Lett., November 7, 2007.

1.8. Предсказан и проанализирован новый эффект прямого преобразования энергии оптического излучения в энергию плазменных колебаний, возбуждаемых в результате быстрой ионизации газа ультракоротким лазерным импульсом. Показана возможность использования этого явления для генерации терагерцового излучения гигаваттного уровня мощности с эффективностью преобразования порядка или более 10%, а также для решения важной задачи фазового контроля лазерных импульсов, содержащих малое число периодов поля.

Авторы: Н.В. Введенский, В.Б. Гильденбург (ИПФ РАН).

Аннотация. Предлагаемый нами новый механизм преобразования оптического излучения в терагерцовое основан на явлении возбуждения собственных плазменных колебаний непосредственно в процессе пробоя газа лазерным импульсом сверхмалой длительности (составляющей малое число периодов оптического поля). Начальный толчок для возбуждения колебаний производится в этом случае непосредственно самим оптическим электрическим полем, сообщаям каждому свободному электрону после его отрыва от атома большую (зависящую от фазы поля) постоянную составляющую скорости. Хотя взаимодействие лазерного импульса со средой в целом, конечно, является при этом нелинейным, сам по себе рассматриваемый механизм возбуждения колебаний (если отвлечься от нелинейности, связанной с процессом ионизации) по сути дела является линейным (или «линейно-параметрическим») по отношению к возбуждающему оптическому полю (полю накачки) и, следовательно, способен обеспечить гораздо более высокую эффективность преобразования этого поля в поле излучения возбуждаемых колебаний. Проведенные нами исследования динамики поля и плазмы в процессе оптического пробоя газа в приосевой области конической линзы (аксикона) показали, что при определенных значениях абсолютной фазы поля (разности фаз между несущей и

огибающей) быстрые волны поляризации, возбуждаемые в кильватерном следе импульса, могут обеспечить очень высокий (гигаваттный) уровень пиковой мощности терагерцового излучения уже при весьма умеренных значениях оптической интенсивности ($\sim 10^{14} - 10^{15}$ Вт/см²). Эффективность преобразования при этом существенно превышает достигающуюся при нелинейных (пандеромоторных) механизмах возбуждения плазменных колебаний и может достигать значений порядка или более 10%. Возможность использования рассмотренного явления для генерации мощного терагерцового излучения и для решения важной задачи фазового контроля в импульсах сверхмалой длительности ставят исследование ионизационно-колебательных процессов в таких импульсах в ряд первостепенных проблем физики лазерной плазмы.

Публикации

V.B. Gildenburg, N.V. Vvedenskii. Physical Review Letters **98**, 245002 (2007).

1.9. Разработаны новые методы обратного моделирования атмосферных источников реактивных газов, позволившие исследовать пространственное распределение эмиссий оксидов азота в Европе, в том числе – Европейской части России, а также получить независимые оценки их изменений за десятилетний период с 1996 по 2005 годы. Методы основаны на вероятностном подходе и осуществляют комбинацию результатов современной трехмерной химическо-транспортной модели и данных спутниковых и наземных измерений состава нижней атмосферы. В результате в имеющихся базах данных традиционных инвентаризаций эмиссий выявлен ряд серьезных неточностей. Впервые продемонстрировано, что обратное моделирование эмиссий реактивных газов на основе использования имеющихся спутниковых измерений может существенно улучшить качество модельных прогнозов приземных концентраций озона и окислов азота.

Авторы: И. Б. Коновалов (ИПФ РАН), M. Beekmann (LISA/CNRS, Франция).

Аннотация. Разработаны новые методы обратного моделирования атмосферных источников реактивных газов на основе комбинированного использования трехмерной химическо-транспортной модели и данных спутниковых и наземных измерений состава нижней атмосферы. Для оценки рассматриваемых параметров атмосферы применяется вероятностный подход, адаптированный к рассматриваемым задачам. В частности, предложены способы самосогласованной оценки неопределенностей используемых данных, что позволило снизить роль субъективного фактора в получаемых оценках эмиссий и, тем самым, повысить их точность. Предложен и реализован численно эффективный алгоритм “обращения” данных спутниковых измерений тропосферного содержания короткоживущих газов, который позволяет учесть их химические превращения и перенос.

Разработанные методы успешно применены для исследования пространственного распределения эмиссий оксидов азота в Европе, в том числе, в европейской части России, а также для оценки их изменений за десятилетний период с 1996 по 2005 годы. В исследовании были использованы данные по тропосферному содержанию двуокси азота, восстановленные сотрудниками университета г. Бремен из измерений, выполненных спутниковыми приборами GOME и SCIAMACHY. В результате в имеющихся базах данных традиционных инвентаризаций эмиссий выявлен ряд серьезных неточностей. В частности, обнаружено, что оценки международной организации ЕМЕП по эмиссиям оксидов азота, вероятно, существенно завышены для Великобритании, Нидерландов, Болгарии и Греции, но занижены для Испании, Италии, бывшей Югославии, Турции и Ирана. Статистически значимые различия между полученными “апостериорными”

оценками и данными ЕМЕР обнаружены также для ряда регионов России. Исследование десятилетних изменений эмиссий NO_x в целом подтвердило существующие экспертные оценки, согласно которым в рассматриваемый период в Западной Европе произошло существенное уменьшение эмиссий оксидов азота, но в то же время выявило существенные отличия от них в Восточной Европе.

С целью валидации полученных оценок интенсивностей эмиссий и их изменений, проведено сравнение рассчитанных приземных концентраций озона и окислов азота с соответствующими данными независимых измерений. В результате показано, что оценки, полученные в результате обратного моделирования, улучшают качество модельных расчетов по сравнению со случаем, когда эмиссии задаются на основе данных ЕМЕР. Тем самым, впервые продемонстрировано, что использование имеющихся спутниковых измерений может способствовать улучшению качества модельных расчетов загрязнения воздуха в приземном слое.

Публикации

1. Konovalov I.B., Beekmann M., Richter A., Burrows J.P. Inverse modelling of the spatial distribution of NO_x emissions on a continental scale using satellite data // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 1747-1770, 2006.

2. Konovalov I.B., M. Beekmann, A. Richter, J. P. Burrows, O. Tarasova, N. Elansky. Photo-oxidant pollution over Eastern Europe and its sources from the modelling perspective // *Air Quality in Eastern Europe, An ACCENT/JRC Expert Workshop*, C.Granier, P. Monks, O. Tarasova, S. Tuncel, P. Borrell Eds., ACCENT secretariat, Rep. 8.2006, Urbino, December 2006, p. 53-59 (по материалам приглашенного доклада).

3. Коновалов И.Б. Региональные различия в десятилетних изменениях атмосферных эмиссий оксидов азота в европейской части России: результаты обратного моделирования на основе спутниковых данных // *Доклады АН*. Т. 417, №5, 2007 (в печати).

4. Konovalov I.B., Beekmann M., Burrows J.P., Richter A. Satellite measurement based estimates of decadal changes in European nitrogen oxides emissions // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007 (submitted).

5. Konovalov I.B., Beekmann M., Richter A., Burrows J. P. The use of satellite and ground based measurements for estimating and reducing uncertainties in the spatial distribution of emissions of nitrogen oxides, arXiv: physics/0612144 (www.arxiv.org), 2006.

1.10. Предложен метод восстановления пространственного распределения концентрации водяного пара в мезосфере (50–90 км) по данным измерений гидроксила и озона, основанный на использовании базовых динамических моделей атмосферных фотохимических систем. Высокая эффективность метода продемонстрирована как путем компьютерного моделирования, так и при обработке спутниковых данных спутниковой кампании CRISTA-MAHRSI. Метод позволяет, в том числе, восстанавливать профиль концентрации водяного пара на высотах верхней мезосферы в условиях существования полярных мезосферных облаков.

Авторы: М.Ю. Куликов, А.М. Фейгин (ИПФ РАН), Г.Р. Зоннеманн (Институт физики атмосферы Ростокского университета, Германия).

Аннотация. Известно, что водяной пар является одной из наиболее важных компонент мезосферы (высоты 50–90 км). Во-первых, реакции с участием H_2O играют ключевую роль в фотохимии этой области атмосферы (в том числе, в химии озона) и, тем самым, определяют основной фотохимический нагрев воздуха на данных высотах. Во-вторых, при низких температурах воздуха (примерно 130–150 К) в области летней мезопаузы (80–90 км) происходит формирование самых высотных облаков на Земле – так называемых полярных мезосферных облаков, чьи частицы состоят из льда и образуются в результате конденсации водяного пара.

Прямое наблюдение за эволюцией H_2O в мезосфере производится с помощью наземных (в мм и см диапазонах длин волн) и спутниковых (мм и ИК) методов пассивного зондирования атмосферы. Целый ряд обстоятельств (например, малые концентрации H_2O , недостаточное вертикальное разрешение, аэрозольное рассеяние и др.) существенно затрудняет определение распределения концентрации H_2O в верхней мезосфере, особенно в условиях существования полярных мезосферных облаков. Естественный выход в такой ситуации – развитие косвенных методов, позволяющих восстанавливать распределение концентрации H_2O из имеющихся экспериментальных данных о распределении других химических компонент мезосферы и основанных на использовании априорных представлений (в виде фотохимических моделей с учетом процессов переноса) о связи между H_2O и непосредственно измеряемыми характеристиками.

В данной работе предложен метод восстановления вертикального распределения концентрации H_2O по данным измерений концентраций O_3 и OH . Он основан на использовании математически корректно упрощенной модели мезосферной фотохимической системы. Данная модель сохраняет в основные качественные и количественные свойства "полной" системы, но включает при этом минимально возможное число *динамических* переменных (концентрации O и HO_x), описываемых *дифференциальными* уравнениями, и максимально возможное число переменных (концентрации $\text{O}(^1\text{D})$, O_3 , H , OH и HO_2), описываемых *локальными* во времени и пространстве соотношениями. Концентрация H_2O считается параметром, т.е. является неменяющейся во времени величиной, зависящей только от координат.

Исходной информацией для восстановления одного распределения $\text{H}_2\text{O}(z)$ являются две пары вертикальных распределений концентраций озона и гидроксила $\{\text{O}_3^{\text{in}}(z), \text{OH}^{\text{in}}(z)\}$ и $\{\text{O}_3^{\text{end}}(z), \text{OH}^{\text{end}}(z)\}$, измеренных в течение одного светового дня (в моменты локального времени $t_{\text{in}} < 10$ ч и $t_{\text{end}} > 12$ ч) и отвечающих близким значениям горизонтальных координат. Эти данные подставляются в алгебраическую систему уравнений модели, что позволяет определить две пары распределений динамических переменных $\{\text{O}^{\text{in}}(z), \text{HO}_x^{\text{in}}(z)\}$ и $\{\text{O}^{\text{end}}(z), \text{HO}_x^{\text{end}}(z)\}$. Полученные данные и дифференциальные уравнения модели используются в рамках специальной итерационной процедуры, которая позволяет однозначно восстановить распределение $\text{H}_2\text{O}(z)$. Конечная цель этой процедуры заключается в отыскании такого профиля данного параметра, при котором распределения динамических переменных $\text{O}(z)$ и $\text{HO}_x(z)$, получаемые в результате расчета конечно-временной (в интервале локальных времен $t \in [t_{\text{in}}, t_{\text{end}}]$) эволюции модели с начальными условиями $\text{O}^{\text{in}}(z)$ и $\text{HO}_x^{\text{in}}(z)$ в момент времени t_{end} оказываются максимально близки распределениям $\text{O}^{\text{end}}(z)$ и $\text{HO}_x^{\text{end}}(z)$.

Предложенный подход протестирован на многочисленных модельных примерах с помощью полной модели МФХС, в которой все переменные рассчитывались как динамические переменные. Данная модель выступала в роли «поставщика» предполагаемых экспериментальных данных. Показано, что восстановленные распределения концентрации паров воды хорошо воспроизводят исходные модельные («правильные») распределения как качественно, так и количественно вплоть до высот 85–87 км.

Предложенный подход успешно применен к данным спутниковых измерений концентраций O_3 и OH (кампания CRISTA-MAHRSI), что позволило восстановить несколько десятков вертикальных распределений концентрации паров воды, отвечающих разным горизонтальным координатам.

Публикации

1. Куликов М.Ю., Фейгин А.М., Зоннеманн Г.Р. Восстановление вертикальных распределений концентраций химических компонент мезосферы по результатам одновременных измерений распределений озона и гидроксила // Изв. ВУЗов. Радиофизика. Т. XLIX, № 9, 760-769, 2006.

2. Kulikov M.Yu., Feigin A.M., Sonnemann G.R. Retrieval of water vapor profile in the mesosphere from satellite ozone and hydroxyl measurements by the basic dynamic model of mesospheric photochemical system // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007 (submitted).

1.11. Разработан новый метод измерения профиля коэффициента запаса устойчивости в тороидальной термоядерной плазме. Метод основан на локальных измерениях отношения полоидального магнитного поля к тороидальному путём анализа оптического сигнала резонансной флуоресценции тестовых нейтральных атомов с зеемановски расщеплённой структурой уровней в условиях когерентного пленения населенности; зависимость сигнала флуоресценции от ориентации магнитного поля относительно лазерного пучка позволяет обеспечить проведение измерений. Данная методика была реализована в модельном лабораторном эксперименте; для оценки точности соответствующих измерений в тороидальных термоядерных установках проведён теоретический анализ. Принципиально достижимая точность определения профиля коэффициента запаса устойчивости соответствует 1% для мощности атомарных пучков в 10–100 КВт и киловаттных лазерных пучков, что на порядок выше таковой для существующих оптических методов. Пространственно-временное разрешение данной методики позволяет уверенно анализировать МГД активность в термоядерных установках.

Авторы: Р.А. Ахмеджанов, Л.А. Гущин, И.В. Зеленский, А.Г. Литвак, М.Д. Токман (ИПФ РАН).

Аннотация. Разработана схема измерения отношения полоидального магнитного поля к тороидальному в термоядерной плазме, основанная на явлении когерентного пленения населенности (КПН) в тестовых атомах для измерения. Эффект КПН состоит в переходе атома в невзаимодействующее со светом состояние, которое имеет место в условиях двухфотонного резонанса при использовании бихроматического лазерного поля.

Предложенная схема измерений предполагает сопоставление интенсивностей сигнала резонансной флуоресценции вне и внутри линии двухфотонного резонанса в тестовых нейтральных атомах с зеемановски расщеплённой структурой уровней. При этом соответствующее отношение интенсивностей сигнала флуоресценции зависит, в частности, от ориентации магнитного поля относительно лазерного пучка. Теоретический анализ проведен для пучков тестовых водородоподобных и гелиоподобных атомов в термоядерной плазме.

Проведенные оценки демонстрируют, что в случае водородоподобных атомов точность измерений по крайней мере не уступает таковой для существующих оптических методов измерений, основанных на динамическом эффекте Штарка (MSE-схема). В случае гелиоподобных тестовых атомов точность измерений должна быть на порядок выше.

В обоих случаях важным достоинством предложенного метода является то обстоятельство, что вектор магнитного поля определяется в системе координат, связанной не с атомарным пучком (как в MSE-схеме), а с намного более легко контролируемым лазерным пучком. Пространственно-временное разрешение данной методики позволяет уверенно анализировать МГД активность в термоядерных установках.

Публикации

R.A. Akhmedzhanov, L.A. Gushchin, I.V. Zelensky, A.G. Litvak, M.D. Tokman. Using coherent population trapping in test atoms for magnetic field measurements in toroidal plasmas, *Physics of plasmas*, 14, 093505 (2007).

1.12. Для циклотронного взаимодействия электронов со встречной волной в протяженной системе с неоднородным магнитным полем найдены условия перехода к многочастотной генерации, при которой происходит разделение пространства взаимодействия на короткие «генераторы». Свойства таких режимов с упорядоченным дискретным (квазидискретным) частотным спектром выходного излучения объясняют важные особенности динамических спектров хоровых ОНЧ излучений и аврорального километрового излучения в магнитосфере Земли и декаметрового излучения Юпитера.

Авторы: П.А. Беспалов, А.Г. Демехов, А.В. Савилов, В.Ю. Трахтенгерц (ИПФ РАН), Е.Е. Титова, Б.В. Козелов (ПГИ КНЦ РАН).

Аннотация. Детально исследована пространственно–временная динамика циклотронного взаимодействия электронного пучка, движущегося в плавно профилированном магнитоэстатическом поле, и встречной электромагнитной волны. В частности, продемонстрировано принципиальное отличие механизма перехода (с ростом величины электронного тока) к многочастотной генерации в протяженной профилированной системе по сравнению с однородным электронным циклотронным генератором встречной волны. Для однородной системы, в которой частоты собственных мод разнесены достаточно сильно, характерно резонансное взаимодействие электронного потока лишь с одной модой. В этом случае переход к многочастотной генерации происходит вследствие так называемого «амплитудного» механизма, когда перегруппировка электронов приводит к тому, что стационарная генерация рабочей моды становится неустойчивой по отношению к колебаниям амплитуды рабочей волны около стационарного состояния.

Принципиальной особенностью генерации в протяженной профилированной системе является ее многочастотный характер: на разных участках пространства электронно-волнового взаимодействия такого генератора возможно резонансное возбуждение разных мод, каждая из которых на «своем» участке оказывается в циклотронном резонансе с электронами. В таком генераторе переход к многочастотным режимам генерации происходит вследствие эффективного разделения пространства электронно-волнового взаимодействия на несколько коротких одночастотных генераторов с различными собственными частотами.

Свойства таких режимов с упорядоченным дискретным (квазидискретным) частотным спектром выходного излучения объясняют важные особенности динамических спектров хоровых ОНЧ излучений и аврорального километрового излучения в магнитосфере Земли и декаметрового излучения Юпитера, а именно – как существование упорядоченных дискретных спектров, так и переход к стохастическим спектрам.

Публикации

1. A.V. Savirov, P.A. Bespalov, K. Ronald, A.D.R. Phelps, Dynamics of excitation of backward waves in long inhomogeneous systems. // Phys. of Plasmas, accepted for publication in 2007.

2. Traktengerts V. Y., Demekhov A. G., Titova E. E., Kozelov B. V., et al., Formation of VLF chorus frequency spectrum: Cluster data and comparison with the backward wave oscillator model // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34, No. 2. L02104, doi:10.1029/2006GL027953.

1.13. Разработан многочастотный гиротрон мегаваттного уровня мощности с широкополосной системой вывода СВЧ излучения через брестерское выходное окно на основе CVD алмазного диска. Использование высокоэффективного синтезированного квазиоптического преобразователя в выходном узле гиротрона и коллектора с рекуперацией остаточной энергии электронов сделало возможным работу гиротрона с КПД около 50% на 6 отдельно-возбуждаемых модах в диапазоне частот 100–150 ГГц.

Авторы: В.И. Белоусов, Г.Г. Денисов, В.Е. Запевалов, А.Г. Литвак, А.Н. Куфтин, В.И. Малыгин, А.Б. Павельев, Е.В. Соколов, А.В. Чирков (ИПФ РАН) совместно с ЗАО НПП «ГИКОМ».

Аннотация: Благодаря своим уникальным выходным характеристикам гиротроны до настоящего времени остаются незаменимыми источниками СВЧ излучения, которое используется для нагрева плазмы в условиях электронно-циклотронного резонанса в установках управляемого термоядерного синтеза.

Недавние оценки показали, что эффективность нагрева можно существенно повысить, если использовать для этих целей генераторы не с фиксированными рабочими частотами (как это делалось ранее), а с дискретной перестройкой частоты, которая может осуществляться в медленном режиме, но должна охватывать достаточно широкий – несколько десятков гигагерц – частотный диапазон.

В принципе, в гиротронах такая перестройка достигается естественным образом за счет возбуждения различных рабочих мод при изменении основного магнитного поля прибора. Однако для сохранения высоких выходных характеристик во всей полосе частот необходимо, во-первых, создать условия для эффективного и селективного взаимодействия электронного потока с несколькими выбранными резонаторными модами, а во-вторых, обеспечить эффективное преобразование всех возбуждаемых мод в выходные волновые пучки с приемлемыми параметрами и вывод этих пучков через выходное окно с малыми потерями во внутреннем объеме генератора.

Институтом прикладной физики РАН совместно с ЗАО НПП «ГИКОМ» разработан, изготовлен и испытан гиротрон мегаваттного уровня выходной мощности со ступенчатой перестройкой частоты в диапазоне 100–150 ГГц. Гиротрон оборудован встроенным широкополосным выходным электродинамическим трактом, а также коллектором с рекуперацией остаточной энергии электронов. Вывод излучения осуществляется в виде узконаправленных линейно-поляризованных волновых пучков с высоким содержанием гауссовой компоненты, которые пропускаются через алмазное выходное окно под углом Брюстера в осевой плоскости прибора. Для формирования волновых пучков с требуемыми параметрами в выходном тракте используются высокоэффективный квазиоптический преобразователь с синтезированной формой боковой поверхности и система синтезированных корректирующих зеркал. Поворот электрического вектора поляризации в нужную плоскость достигается с помощью поляризатора, выполненного в виде дифракционной гребенки специального профиля, нанесенной на поверхность плоского зеркала. Необходимая подстройка параметров электронного потока при изменении основного магнитного поля (т.е. при перестройке частоты генератора) обеспечивается подстройкой магнитного поля дополнительной катодной катушки.

В экспериментах мегаваттный уровень выходной мощности (при КПД генерации около 50%) был реализован на 6 отдельно-возбуждаемых рабочих модах. Для всех мод измеренные дифракционные потери имели вполне допустимую (единицы процентов) величину, а содержание Гауссовой компоненты в выходном пучке составляло 97–98%.

Публикации

1. Чирков А.В., Денисов Г.Г., Кулыгин М.Л., Малыгин В.И., Малыгин С.А., Павельев А.Б., Солюянова Е.А. Использование принципа Гюйгенса для анализа и синтеза полей в сверхразмерных волноводах // Изв. вузов. Радиофизика. 2006, Т. 49, № 5, с. 381.

2. A.V.Chirkov, G.G.Denisov et al. Huygens principle application for the field analysis and synthesis in oversized waveguides // J. of Radiophysics and Quantum Electronics, V. 49, № 5. 2006.

3. G.G.Denisov, A.G.Litvak, V.E.Myasnikov, E.M.Tai, V.E.Zapevalov. Recent Results of Development in Russia of High Power Gyrotrons // Proc. of the Eighth IEEE International Vacuum Electronics Conference, Kitakyushu, Japan, May 15-17, p. 43-44.

1.14. Предложен и реализован в эксперименте высокоэффективный узкополосный мазер на свободных электронах (МСЭ) с высокоселективным брэгговским резонатором и обратным ведущим полем. Получено излучение на частоте 30 ГГц с выходными характеристиками (выходная мощность, длительность импульса, ширина спектра, стабильность одномодового режима генерации), которые позволили использовать МСЭ для запитки высокочастотного резонатора, моделирующего деградацию элементов ускоряющих структур проекта SLIC (ЦЕРН) при многократном воздействии СВЧ-импульсов (эффект «тепловой усталости»).

Авторы: Н.С. Гинзбург, С.В. Кузиков, Н.Ю. Песков, М.И. Петелин, А.С. Сергеев (ИПФ РАН), А.К. Каминский, Э.А. Перельштейн, С.Н. Седых (ОИЯИ, Дубна).

Аннотация. Высокоэффективный узкополосный МСЭ-генератор реализован в совместных экспериментах ОИЯИ и ИПФ РАН. МСЭ запитывается линейным индукционным ускорителем ЛИУ-3000 (ОИЯИ, Дубна), формирующим релятивистский электронный пучок 0.8 МэВ / 200 А / 200 нс, и генерирует 30-ГГц импульсы с мощностью 20 МВт и длительностью 200 нс с частотой следования до 1 Гц. Ширина спектра излучаемых импульсов составляет 6–8 МГц, что близко к естественной ширине линии генератора. Высокая эффективность и узкий частотный спектр достигнуты за счет использования режима обратного ведущего поля, обеспечивающего высокое качество формирования винтового релятивистского электронного пучка, и нового типа брэгговского резонатора – резонатора со скачком фазы гофрировки в пространстве взаимодействия, обладающего высокими селективными свойствами.

Достигнутые уровень мощности и стабильности режима одномодовой одночастотной генерации позволили реализовать на базе МСЭ экспериментальный стенд для исследования эффекта деградации меди под воздействием мощных СВЧ-импульсов. Необходимая для создания ускорителей нового поколения, разрабатываемых в SLIC (ЦЕРН) и SLAC, экспериментальная информация о поведении материалов (металлов и диэлектриков) под воздействием сильных электромагнитных волн миллиметрового диапазона является в настоящее время весьма неполной. Разработан тестовый резонатор, моделирующий температурный режим ускоряющих структур проекта SLIC (ЦЕРН). Возможность запитки высокочастотной нагрузки излучением МСЭ продемонстрирована сначала в нестационарном моделировании и затем подтверждена экспериментально. Измеренные в «холодных» и «горячих» тестах электродинамические характеристики стенда близки к расчетным. Получен расчетный нагрев поверхности меди более 150° в течение одного СВЧ-импульса. Работоспособность стенда и стабильность параметров излучения МСЭ в настоящий момент продемонстрирована в статистике ~ 10⁵ импульсов, начаты эксперименты по набору статистики ~ 10⁶ импульсов.

Публикации

1. А.В. Елжов, Н.С. Гинзбург, Н.И. Зайцев, И.Н. Иванов, Е.В. Иляков, А.К. Каминский, В.В. Косухин, С.В. Кузиков, И.С. Кулагин, Н.Ю. Песков, Э.А. Перельштейн, М.И. Петелин, С.Н. Седых, А.П. Сергеев, А.С. Сергеев, И.В. Сырачев. Стенд для исследования ресурса имитатора ускоряющей структуры коллайдера SLIC при воздействии мощного импульсного излучения на частоте 30 ГГц // Письма в Журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». 2005. Т. 2, №3 (126), с. 102-105.

2. Н.С. Гинзбург, А.К. Каминский, С.В. Кузиков, Э.А. Перельштейн, Н.Ю. Песков, С.Н. Седых, А.П. Сергеев, А.С. Сергеев. О возможности использования МСЭ с брэгговским резонатором для тестирования высокочастотных резонансных структур // ЖТФ. 2006. Т. 76, № 7, с. 69-75.

3. N.Yu. Peskov, N.S. Ginzburg, A.V. Elzhov, A.K. Kaminsky, A.P. Kozlov, S.V. Kuzikov, A.V. Pavlov, E.A. Perelstein, M.I. Petelin, S.N. Sedykh, A.P. Sergeev, A.S. Sergeev, A.I. Sidorov. Progress in development of JINR-IAP FEM with applications in RF testing properties of materials // Proc. of the 16th Int. Conf. on High-Power Particle Beams (BEAMs-2006), Oxford, UK, July 9-13, 2006, p.56.

1.15. Предложен субмиллиметровый мазер на свободных электронах, в котором в качестве накачки используется волна миллиметрового диапазона, возбуждаемая в брэгговском резонаторе в режиме ондуляторного синхронизма, а субмиллиметровая волна генерируется на высокой гармонике накачки в режиме встречного рассеяния на том же электронном пучке. В демонстрационном эксперименте на электронном пучке с энергией 0.8 МэВ получен киловаттный уровень выходной мощности в диапазоне 0.8 мм.

Авторы: Ю.К. Калынов, С.В. Кузиков, Н.Ю. Песков, А.В. Савилов (ИПФ РАН), А.К. Каминский, Э.А. Перельштейн, С.Н. Седых (ОИЯИ, Дубна).

Аннотация. Возможность создания мощного источника субмиллиметрового диапазона длин волн на основе электронного пучка с умеренно-релятивистской энергией исследуется в сотрудничестве ИПФ РАН и ОИЯИ. Основой проекта являются совместные экспериментальные исследования, в которых реализован высокоэффективный узкополосный МСЭ-генератор (убитрон) с брэгговским резонатором: на частоте 30 ГГц получена мощность излучения на уровне 20–30 МВт при ширине спектра 6–10 ГГц, стабильность мощности и частоты генерации продемонстрирована в последовательности $\sim 10^5$ импульсов.

Для продвижения генератора в субмиллиметровый диапазон предложена оригинальная схема брэгговского лазера на свободных электронах (МСЭ) с совместным возбуждением двух электронно-волновых резонансов: убитронного и скаттронного. В этой схеме одновременно с убитронным возбуждением попутной мм волны происходит рассеяние встречной мм волны обратной связи, реализуемой в брэгговском резонаторе, в попутную электронному потоку суб-мм волну (скаттронный механизм) на умноженной частоте. Кратность частот мм и суб-мм волн увеличивает эффективность работы предлагаемой схемы и допускает отсутствие цепи обратной связи для суб-мм волны, т.к. в этих условиях оба резонанса могут одновременно существовать на одном сгруппированном электронном пучке. Рассмотрены различные возможные реализации новой схемы МСЭ, показаны пути увеличения эффективности и стабильности генерации. Высокий уровень КПД в двухчастотном МСЭ при использовании магнитоуправляемого электронного потока предполагается достичь в режиме обратного ведущего поля. На основе линейного индукционного ускорителя ЛИУ-3000 (0.8 МэВ / 200 А / 200 нс, ОИЯИ) разработан проект МСЭ с длиной волны выходного излучения 0.8 мм (12-ая гармоника частоты) и выходной мощностью на уровне $\sim 10^4 - 10^5$ Вт.

Разработана система диагностики суб-мм излучения, включающая оригинальную дифракционную решетку, которая позволяет пространственное разделение суб-мм волнового пучка с мм пучком, превосходящим на порядок по мощности. Проведены первые эксперименты по генерации суб-мм излучения. В расчетной области параметров зарегистрировано излучение с длиной волны короче 1 мм. По калибровке детектора и расчетной диаграмме направленности излучения МСЭ мощность зарегистрированных суб-мм импульсов может быть оценена на кВт-уровне. Таким образом, в начальных экспериментах подтверждена работоспособность предложенной схемы МСЭ.

Публикации

1. N.Yu. Peskov, A.V. Saviлов, Yu.K. Kalynov, S.V. Kuzikov, D.Yu. Shegolkov, A.V. Elzhov, A.K. Kaminsky, A.P. Kozlov, E.A. Perelstein, S.N. Sedykh. *Progress in development of powerful sub-*

mm Bragg FEM based on moderately relativistic electron beam. Conference Digest of the Joint 31st Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 14th Int. Conf. on Terahertz Electronics, Shanghai, China, Sept. 18-22, 2006, p.573-574.

2. N.Yu. Peskov, S.V. Kuzikov, Yu.K. Kalynov, A.V. Savilov, A.K. Kaminsky, E.A. Perelstein, S.N. Sedykh. *Sub-mm Bragg FEM based on moderately relativistic electron beam: project and first experiments*. Conference Digest of the Joint 32nd Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 15th Int. Conf. on Terahertz Electronics, Cardiff, UK, Sept. 3-7, 2007, v. 2, p. 845-846.

1.16. Исследована динамика медленных переходных токов молниевых вспышек и роль этих токов в глобальной электрической цепи. В период интенсивной молниевой активности вклад переходных токов в глобальную цепь может быть порядка квазистационарного тока грозы. Эффективность вспышек облако-земля существенно зависит от высоты расположения заряда в проводящей атмосфере, изменяясь от 15% до 90% в интервале высот от 1 до 14 км над землей. Полученные результаты подтверждены прямыми измерениями медленной компоненты электрического поля в натуральных условиях.

Авторы: С.С. Давыденко, В.В. Клименко, Е.А. Мареев, Ю.В. Шлюгаев, С.А. Яшунин (ИПФ РАН).

Аннотация. В последнее время получен ряд новых результатов, которые привели к более глубокому пониманию физических процессов в глобальной электрической цепи. Разработан ряд новых моделей (в основном численных) стационарных глобальных токовых систем. Однако вопрос о роли нестационарных процессов, прежде всего молниевых вспышек, в глобальной цепи оставался до недавнего времени открытым.

В настоящем цикле работ была исследована динамика переходных токов, текущих после молниевых вспышек (переходная стадия может длиться от нескольких десятков до нескольких сотен секунд и приводит к переносу заряда в ионосферу и частичной нейтрализации заряда, перенесённого на землю), и вклад этих токов в глобальную электрическую цепь. Установлено, что и вспышки облако-земля, и внутриоблачные вспышки, наряду с быстрыми, генерируют значительные по величине медленные переходные токи. Вспышки облако-земля «нормальной полярности» поддерживают глобальную цепь, тогда как внутриоблачные вспышки «нормальной полярности» приводят к ее релаксации. Эффективность вспышек облако-земля (т.е. отношение суммарного заряда, перенесенного в ионосферу и на землю) существенно зависит от высоты расположения заряда в проводящей атмосфере, изменяясь в пределах от 15% до 90% в интервале высот от 1 до 14 км над землей (в модели с экспоненциальной проводимостью). Эффективность внутриоблачных вспышек в среднем значительно 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.

Выполнены оценки глобального баланса переходных токов, показывающие, что в период интенсивной молниевой активности вклад переходных токов, обусловленных молниевыми вспышками, может быть по величине порядка квазистационарного тока. В глобальном токовом балансе, однако, вклад переходных токов, скорее всего, не превышает 20%.

Можно надеяться, что в ближайшее время нестационарные модели глобальной цепи будут доведены до уровня, позволяющего описывать крупномасштабные геофизические возмущения и долгосрочную эволюцию системы, а также продвинуться в понимании особенностей атмосферного электричества на других планетах Солнечной системы.

1. Mareev E.A., Yashunin S.A., Davydenko S.S., Marshall T.C., Stolzenburg M., Maggio C. On the role of transient currents in the global atmospheric electric circuit // *Geophys.Res.Lett.* 2007 (submitted).

2. E. Mareev, S. Yashunin, S. Davydenko, T. Marshall, M. Stolzenburg. Modeling the transient currents in the global electric circuit. Accepted for the AGU Fall Meeting, San-Francisco, USA, 11-15 December, 2006.

3. E.A. Mareev, A.A.Evtushenko, S.A.Yashunin. On the modeling of sprites and sprite-producing clouds in the global electric circuit, In: *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges*, Ed.: M.Fullekrug, E.Mareev, M.Rycroft, NATO Science Series, V. 225, Springer, 2006. P. 313-340.

4. Е.А. Мареев, С. В. Анисимов, С. С. Давыденко, С. А. Яшунин. Некоторые проблемы динамики и энергетики глобальной электрической цепи // *Сборник трудов VI Рос. конф. по атмосферному электричеству*, 1-7 октября, 2007. Н. Новгород. С. 57-58.

5. S.A. Yashunin, E.A. Mareev, S.S. Davydenko, T.C. Marshall, M. Stolzenburg, C.R. Maggio. Modeling transient currents above the thunderstorm clouds, *Proc. 13-th Int. Conf. Atm. Electricity*, 2007, V. 1. P. 80-83.

1.17. Проведено лабораторное и численное моделирование инициации молниевых разрядов с помощью тонкого плазменного канала, формируемого фемтосекундными импульсами тераваттного уровня мощности в квазиоднородном электрическом поле грозового облака. Установлен механизм пробоя газа в канале и определена минимальная напряженность электрического поля инициации разряда с помощью одного лазерного импульса – 7 кВ/см. Показана возможность снижения пороговой для инициации разряда напряженности электрического поля до типичной для грозового облака величины 1 кВ/см с использованием серии фемтосекундных импульсов

Авторы: Н.А. Богатов, А.Н. Степанов (ИПФ РАН), Н.Л. Александров (МФТИ), Э.М. Базелян (ЭНИН).

Аннотация. Проведено лабораторное моделирование формирования самоподдерживающегося плазменного канала в атмосфере в квазиоднородном электрическом поле грозового облака, инициируемое фемтосекундным импульсом тераваттного уровня мощности. Поскольку продолжительность этого процесса много меньше времени поляризации плазменного канала во внешнем электрическом поле, процесс формирования самостоятельного разряда в канале (пробоя газа в канале) происходит при постоянной величине электрического поля в нем. Поэтому адекватным лабораторным моделированием первого этапа инициирования молнии с помощью создаваемого лазерным излучением плазменного канала – пробоя газа в канале, – является лазерная инициация разряда в плоском газоразрядном промежутке.

В нашем эксперименте филаментированный лазерный пучок проходил в плоский газоразрядный промежуток через отверстия (диаметром 3 мм) в электродах. Отрезок филаменты, находящийся внутри газоразрядного промежутка замыкался на электроды посредством пробоя маленьких (~ 1.5 мм) зазоров между филаментом и электродами. Напряжение на этих зазорах не менялось при изменении расстояния между электродами, а напряжение на отрезке филаменты увеличивалось пропорционально расстоянию, поэтому минимальную (пороговую) величину электрического поля, в котором возможна инициация разряда в постоянном поле с помощью лазерного филамента, можно определить по наклону зависимости порогового напряжения инициированного разряда от расстояния между электродами. Она составила 6.85 кВ/см для атмосферного давления воздуха. В экспериментах были также измерены зависимости порогового напряжения инициированного разряда от энергии и длительности лазерного импульса.

Инициированный пробой, регистрируемый по резкому нарастанию тока, происходит через некоторое время после лазерного импульса. Это время сильно, на 3 порядка величины, уменьшалось при увеличении напряжения на электродах в два раза –

от порога инициированного до порога самостоятельного разряда. В искровом разряде никогда не наблюдалось столь сильная зависимость времени формирования разряда от воздействующего напряжения. Воспроизводство этого обстоятельства в расчетной модели процесса может служить достаточно весомым аргументом в пользу ее достоверности. Нами был проведен численный расчет процесса инициации с учетом 27 сортов частиц и свыше 150 реакций с их участием. Результаты численного расчета хорошо воспроизводят экспериментальные данные и позволяют выявить механизм инициации.

Поскольку характерная величина атмосферного поля вблизи грозových облаков (~ 1 кВ/см) существенно меньше полученной нами порогового поля инициации, то можно заключить, что инициация молнии одним филаментом невозможна. Для понижения порогового поля инициации нами было предложено использовать серию фемтосекундных импульсов, последовательно создающих филаменты в одном и том же месте пространства. Эффект нагрева газа в канале филамента с ростом числа импульсов должен нарастать взрывным образом вследствие роста проводимости плазмы и уменьшения теплоемкости газа в канале при его расширении. Поэтому, как показали оценки, сравнительно небольшого (12–14) числа импульсов должно быть достаточно для инициации разряда в поле 1 кВ/см. Период повторения импульсов в серии должен превышать характерное время расширения нагретого газа в канале (время пробега звуком радиуса канала, ~ 100 нс), а длительность всей серии должна быть меньше характерного времени остывания газа в канале за счет теплопроводности (~ 10 мкс).

Публикации

1. N.A. Bogatov, Triggering of Lightning by Series of Femtosecond Laser Pulses // Proc. 13th Int. Conf. on Atmospheric Electricity, p. 521-524. Beijing, Aug.13-17, 2007.

2. Н.Л. Александров, Э.М. Базелян, Н.А.Богатов, А.Н.Степанов, Исследование механизма инициации разряда в постоянном поле при филаментации мощного фемтосекундного лазерного пучка в воздухе // Сборник трудов VI Рос. конф. по атмосферному электричеству, с. 131-132. Н.Новгород, 1-7 окт., 2007.

1.18. В совместных экспериментах с NRL и Yale University по активной компрессии мощных СВЧ импульсов на частоте 11.4 ГГц достигнуты рекордные параметры: мощность сжатого импульса 70 МВт, длительность импульса 60 нс, коэффициент сжатия по мощности 8.5, КПД 60 %. Реализация таких параметров стала возможной благодаря созданию плазменного переключателя, осуществляющего модуляцию добротности накопительного резонатора и обладающего на всех стадиях работы компрессора высокой электропрочностью, обеспеченной размещением поверхности разрядника в узле поля стоячей волны, возникающей в переключателе.

Авторы: А.Л. Вихарев, А.М. Горбачев, О.А. Иванов, В.А. Исаев, М.А. Лобаев, С.В. Кузиков (ИПФ РАН), Дж.Л. Хиршфилд (Yale University and Omega-P, Inc., New Haven, USA), С.Х. Голд (Naval Research Laboratory, Washington DC, USA).

Аннотация. Представлены результаты исследования нового типа плазменного переключателя, обеспечивающего модуляцию добротности накопительного резонатора СВЧ компрессора за счет трансформации осесимметричных мод $TE_{02} \rightarrow TE_{01}$ круглого волновода. Высокая электропрочность переключателя обеспечивается размещением поверхности разрядника в узле поля, возникающей в переключателе стоячей волны. Проведены испытания переключателя в составе мощного активного двухканального компрессора СВЧ импульсов, возбуждаемого магнитоном на частоте 11,4 ГГц на мегаваттном уровне мощности. При падающей мощности 8,5 MW получены сжатые импульсы с мощностью до 70 МВт, длительностью 50–60 нс и коэффициентом усиления

по мощности 8–8,5. Эффективность компрессии составляла 50–60 % в зависимости от выходной длительности импульса. СВЧ компрессоры с переключателями нового типа могут найти широкое применение в радиолокационной технике и для возбуждения ускоряющих структур линейных ускорителей заряженных частиц.

Публикации

А.Л. Вихарев, А.М.Горбачев, О.А. Иванов, В.А. Исаев, С.В. Кузиков, М.А. Лобаев. Плазменный переключатель для мощных СВЧ компрессоров трехсантиметрового диапазона, основанный на преобразовании мод TE₀₂-TE₀₁ круглого волновода // Письма ЖТФ. Т. 33, вып.18, с. 54-60. 2007.

1.19. С использованием частотно-фазовых детекторов разработана серия синхронизаторов, которые обеспечивают широкий диапазон перестройки миллиметровых и субмиллиметровых синтезаторов (десятки ГГц) и одновременно, за счет высокой частоты сравнения (до 900 МГц), позволяют осуществлять быстрое сканирование частоты в пределах сотен МГц за время в десятки микросекунд с сохранением непрерывности фазы. Разработанные синхронизаторы находят широкое применение в спектроскопии сверхвысокого разрешения.

Автор: А.П. Шкаев (ИПФ РАН).

Публикации

1. Parshin V.V., Tretyakov M.Yu., Andrianov A.F., Shkaev A.P. The 36-360 GHz range resonator spectrometer for investigations of solid, liquid and gaseous dielectrics and metals reflectivity. Conf. Digest of the Joint 30th Int. Conf. on IR&MMW and 13th Int. Conf. on Terahertz Electronics. USA, p. 217-218, 2005.

2. M.Yu. Tretyakov, V.V. Parshin, M.A. Koshelev, A.P. Shkaev, A.F. Krupnov. Extension of the Range of Resonator Scanning Spectrometer into Submillimeter Band and Some Perspectives of Its Further Developments, Journal of Molecular Spectroscopy, V. 238, 2006, 91-97. V. 238, p. 126-132, 2006.

3. Лубяко Л.В., Шкаев А.П., Дрягин Ю.А. «Стенд для прецизионных измерений частотных характеристик режекторных фильтров в двухмиллиметровом диапазоне волн» // Приборы и техника эксперимента, 2006, №6, с. 1-3.

