

**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. Разработана технология выращивания из газовой фазы комбинированных подложек, содержащих поликристаллический и монокристаллический CVD алмаз. На таких подложках получены эпитаксиальные слои необходимого качества для последующего формирования полупроводниковых алмазных структур. Пластины комбинированного алмаза толщиной 200-500 мкм и диаметром до 100 мм пригодны для создания на монокристаллической поверхности электронных приборов в технологических линиях уже разработанных для кремниевой технологии. Реализация предложенного подхода приведет к созданию электронных приборов, обладающих наилучшими характеристиками в виду значительно более высокой, чем у кремния, подвижности носителей и устойчивости CVD алмаза к сторонним излучениям, высокому давлению и температурным перепадам.

Авторы: А.Л. Вихарев, А.М. Горбачев, А.Б. Мучников (Институт прикладной физики РАН), М.П. Духновский, А.К. Ратникова, Ю.Ю.Федоров (ФГУП «НПП «ИСТОК», Фрязино)

Аннотация: В работе решались две задачи. Первая - исследование получения подложек, в которых моно- и поликристаллический алмаз образуют единую пластину. Вторая – шлифовка пластин и исследование эпитаксиального роста алмазных пленок из газовой фазы на комбинированных подложках, содержащих участки поликристаллического и монокристаллического CVD алмаза с ориентацией (100). В ходе проведенных экспериментов определялись условия, при которых происходило осаждение моно- и поликристаллических алмазных пленок высокого качества, а также изучались условия шлифовки комбинированных подложек методом термического травления.

Публикации

1. Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Dukhnovsky M.P., Muchnikov A.B., Ratnikova A.K., Fedorov Yu.Yu., Characteristic features of epitaxial growth of CVD diamond films by microwave plasma-assisted chemical vapor deposition on various substrates./ Proceedings of 8th International Workshop “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications”, Nizhny Novgorod: IAP, 2011, p.305-306.

2. А.Л. Вихарев, А.М. Горбачев, М.П. Духновский, А.Б. Мучников, А.К. Ратникова, Ю.Ю.Федоров, Комбинированные подложки из поли- и монокристаллического CVD алмаза для алмазной электроники.// Физика и техника полупроводников, 2012, т.46, №2.

3. А.К. Ratnikova, M.P. Dukhnovsky, Yu.Yu. Fedorod, V.E. Zemlyakov, A.B. Muchnikov, A.L. Vikharev, A.M. Gorbachev, D.B. Radishev, A.A. Altukhov, A.V. Mitenkin, Homoepitaxial single crystal diamond grown on natural diamond seeds (type IIa) with boron-implanted layer demonstrating the highest mobility of 1150 cm²/Vs at 300⁰K for ion-implanted diamond.// Diamond and Related Materials, 2011, v.20, pp.1243-1245.

1.2. В испытаниях прототипа мегаваттного непрерывного 170 ГГц гиротрона для ИТЭР достигнута рекордная мощность 1.2 МВт в импульсах длительностью 100 секунд при КПД 52%. Увеличение мощности гиротрона позволит повысить эффективность электронно-циклотронной системы.

Авторы: А.Г. Литвак, Г.Г. Денисов, В.Е. Запелалов, А.Н. Куфтин. (ИПФ РАН) совместно с ЗАО НПП «ГИКОМ» и ИФТ РНЦ «Курчатовский Институт»

Аннотация. Для системы электронно-циклотронного нагрева строящейся в настоящее время плазменной установки УТС – ИТЭР разрабатываются 170 ГГц гиротроны с проектной выходной мощностью 1 МВт в длинных импульсах несколько сотен секунд. Система включает 24 гиротрона и соответствующее число волноведущих трактов и антенн. Каждый гиротрон работает в своем сверхпроводящем магните с полем около 7 Т. Очевидно, что сама система и ее эксплуатация упрощается, если каждый из гиротронов может генерировать большую мощность.

В рамках выполняемой в ИПФ РАН научно-исследовательской работы проанализированы возможности повышения мощности в гиротроне с рабочей модой TE_{25,10}. Результаты анализа показывают, что система охлаждения резонатора при увеличении потока воды обеспечивает теплосъем со стенок резонатора, сохранение высокого КПД при большей на 20 % мощности возможно при увеличении рабочего тока с 45 А до 53 А. Увеличение рабочего тока потребовало оптимизации распределения магнитного поля для устранения «ловушек» электронов и снижения вероятности разряда Пеннинга.

В результате выполненных оптимизаций в разработанном ранее 1 МВт гиротроне для ИТЭР была получена генерация с мощностью 1.2 МВт при КПД 52% в импульсах с длительностью до 100 секунд.

Публикации

1. L.G.Popov et al. Development in Russia of 170 GHz Gyrotron for ITER. Proceedings of SMP-2011.

2. A.G.Litvak, et al, Recent Results of Development in Russia of 170 GHz Gyrotron for ITER. Proceedings of the 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Huston, 2011.

2. A.G.Litvak, G.G.Denisov, V.E.Myasnikov, E.M.Tai, E.A.Azizov, V.I.Ilin. Development in Russia of Megawatt Power Gyrotrons for Fusion, International Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2011, V.32, №3, pp. 337-342.

1.3. Разработана одностадийная технология плазмохимического осаждения тонких (толщиной несколько микрон) слоев кремния из его тетрафторида, обеспечивающая минимальное изотопное разбавление. Технология основана на использовании сильнонеравновесного разряда, поддерживаемого в магнитной ловушке излучением миллиметрового диапазона длин волн в условиях электронно-циклотронного резонанса.

Получены слои микрокристаллического кремния на молибдене и изотопно-обогащенном монокристаллическом кремнии с рекордным изотопным обогащением по изотопу ²⁸Si - 0.999986±0.000003 и изотопным разбавлением менее 10⁻⁵.

Авторы: П. Г. Сенников (Институт химии высокочистых веществ, Институт прикладной физики), А. М. Водопьянов, С. В. Голубев, Д. А. Мансфельд (Институт прикладной физики), М. Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, Б. А. Андреев, Л. В. Гавриленко, Д. А. Пряхин, В. И. Шашкин (Институт физики микроструктур), О. Н. Годисов, А. И. Глазунов, А. Ю. Сафонов (Центральное дизайнерское бюро строительных машин, Санкт-Петербург), Н.-J.Pohl (VITCON Projectconsult GmbH, Jena, Germany), M.L.W. Thewalt (Physics Department, Simon Fraser University, Burnaby, Canada), P.Becker (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany), H.Riemann, N.V.Abrosimov (Leibniz-Institute for Crystal Growth, Berlin, Germany), S.Valkiers (EU Institute for Reference Materials and Measurements, Belgium)

Аннотация. Природный кремний состоит из трех стабильных изотопов. Ряд его физических свойств (частота и время жизни фононов, теплопроводность, постоянная решетки и т.д.) существенно зависят от изотопного состава. Высокообогащенный по

изотопу ^{28}Si (более 99,9%) кремний находит применение или перспективен для решения следующих фундаментальных и прикладных задач: создание физически обоснованного эталона массы, создание кремниевого квантового компьютера, получение сверхрешеток для кремниевого терагерцового лазера, исследования в области спектроскопии твердого тела сверхвысокого разрешения и т.д. Достигнутое ранее максимальное обогащение кремния по изотопу ^{28}Si составляет 0,999945 при изотопном разбавлении по отношению к исходному фториду $2 \cdot 10^{-6}\%$. При этом образец кремния был получен в результате многостадийного химического передела исходного $^{28}\text{SiF}_4$. Нами была показана возможность эффективного прямого получения ^{28}Si путем плазмохимического водородного восстановления $^{28}\text{SiF}_4$ в ЭЦР разряде, поддерживаемом гиротроном с частотой 24 ГГц. В результате получены образцы слоев кремния с рекордным обогащением 0.999986 ± 0.000003 и изотопным разбавлением $1 \cdot 10^{-6}\%$.

Публикации

1. М.Н.Дроздов, Ю.Н.Дроздов, Д.А.Пряхин, В.И.Шашкин, П.Г.Сенников, Х-Й.Поль. Количественный безэталонный анализ концентрации изотопов 28,29,30Si в кремнии методом ВИМС на установке TOF.SIMS-5.// Известия РАН. Серия физическая. 2010. Т.74.№1.С.82-84.

2. P.Sennikov, D.Pryachin, B.Andreev, L.Gavrilenko, Yu.Drozdov, M.Drozdov, H.-J.Pohl, V.Shashkin. Plasma-enhanced chemical vapor deposition of 99,95% ^{28}Si in form of nano- and polycrystals using silicon tetrafluoride as precursor.// Cryst.Res.Technol. 2010. V.45. No9. P.983-987.

3. P.Sennikov, D.Pryachin, N.Abrosimov, B.Andreev, L.Gavrilenko, Yu.Drozdov, M.Drozdov, A.Kuznetsov, A.Murel, H.-J.Pohl, H.Riemann, V.Shashkin. PECVD growth of crystalline silicon from its tetrafluorid.// Cryst.Res.Technol. 2010. V.45. No9. P.899-908.

4. E. Bulska, M.N. Drozdov, G. Mana, A. Paramann, O. Rienitz, P. Sennikov, S. Valkiers, The isotopic composition of enriched Si: a data analysis.// Metrologia. 2011. V.48, P.32-S36.

5. П.Г.Сенников, С.В.Голубев, В.И.Шашкин, Д.А.Пряхин, Н.В.Абросимов. Прямое плазмохимическое получение кристаллических кремния и германия различного изотопного состава из их тетрафторидов.// Перспективные материалы. Специальный выпуск. 2011. №10. С.160-166.

6. V.A.Vodopyanov, S.V.Golubev, D.A.Mansfeld, P.G.Sennikov, Yu.N.Drozdov. Experimental investigations of silicon tetrafluoride decomposition in ECR discharge plasma.// Rev.Sci.Instrum. 2011. V.82. P.063503.

1.4. Методом выжигания долгоживущих спектральных провалов в неоднородно уширенной линии поглощения ионов Pr^{3+} , внедренных в LaF_3 , реализована спектральная селекция - выделение группы частиц с разбросом по резонансным частотам, меньшим сверхтонкого расщепления рабочих уровней. Продемонстрирована возможность реализации кубитов (базовых элементов квантовых вычислений) на ансамблях спектрально выделенных частиц и осуществления основных операций над ними, включая манипуляцию населенностями сверхтонких (кубитовых) уровней и контролируемый сдвиг линии поглощения одной спектрально выделенной группы ионов при возбуждении другой (двухкубитовые операции). Показано также, что использование спектральной селекции позволяет существенно увеличить степень просветления среды в условиях электромагнитно индуцированной прозрачности (ЭИП) по сравнению со средой без частотной селекции, что является важным при создании устройств хранения квантовой информации на основе ЭИП-поляритона (связанное состояние фотона и спиновой когерентности).

Авторы: Ахмеджанов Р.А., Бондарцев А.А., Гушин Л.А., Зеленский И.В., Литвак А.Г.

Аннотация. Проведены начальные эксперименты по разработке основных элементов квантовых вычислений (одно- и двухкубитовых операции) и хранения оптической (в том числе квантовой) информации на основе кристаллов, активированных ионами редкоземельных металлов. Методом выжигания долгоживущих спектральных провалов в неоднородно уширенной линии поглощения ионов Pr^{3+} , внедренных в LaF_3 , реализована спектральная селекция (выделение группы частиц с неоднородной шириной меньшей сверхтонкого расщепления рабочих уровней), манипуляция населенностями сверхтонких (кубитовых) уровней, а также контролируемый сдвиг линии поглощения одной спектрально выделенной группы ионов при возбуждении другой (двухкубитовые операции), демонстрирующие возможность реализации кубитов на основе ансамблей частиц и осуществления основных операций над ними. Показано, что использование специально подготовленного (селективно отсортированного по частоте внутри неоднородного контура) ансамбля частиц позволяет существенно увеличить степень просветления среды в условиях электромагнитно индуцированной прозрачности по сравнению со средой без подготовки, что расширяет возможности хранения оптического импульса в среде в форме ЭИП-поляритона (связанное состояние фотона и спиновой когерентности). Полученные результаты могут быть полезны при разработке базовых элементов систем обработки, хранения и передачи квантовой информации на основе кристаллов, активированных редкоземельными металлами.

Публикации

1. Письма в ЖЭТФ, 2011, т. 94, стр. 585-589, Proc. International Conference on Quantum Technologies, Thu-40P, Moscow, July 13-17, 2011 Proc. 20th International Laser Physics workshop, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, July 11-15, 2011

1.5. На уровне выходной мощности 10 кВт в гиротроне получена быстрая (2кГц) ступенчатая модуляция частоты излучения на величину около 2% (28.1 ГГц /28.7 ГГц), за счет изменения магнитного поля в резонаторе дополнительным соленоидом малой индуктивности. При фиксированной частоте генерируемого излучения показана также возможность 100% модуляции СВЧ мощности при изменении поля соленоида.

Использование СВЧ генератора с такими свойствами может принципиально повысить эффективность технологических установок для термической обработки материалов, источников многозарядных ионов, плазменных реакторов для выращивания алмазных пленок и дисков.

Авторы: Глявин М.Ю., Лучинин А.Г., Морозкин М.В., Быков Ю.В., Денисов Г.Г., Чирков А.В.

Аннотация. Комплексы микроволновой обработки материалов на базе гиротронов успешно используются для изготовления наноструктурных керамик и композитов, выращивания пленок и дисков высокочистых твердых материалов с применением CVD технологии, создания пучков многозарядных ионов. Основой комплексов служат непрерывные гиротроны на второй гармонике гирочастоты, мощностью 10 – 15 кВт с частотой выходного излучения 24 – 28 ГГц. Повышение ионного тока возможно за счет увеличения объема разряда, что обеспечивается расширением зоны резонансного взаимодействия при быстром (по сравнению с характерным временем диффузии плазмы) переключении частоты гиротрона. Ширина полосы в данном случае должна составлять 2-3%, а время переключения, согласно теоретическим оценкам, порядка 1 мс. В комплексах микроволновой обработки материалов указанное переключение частот обеспечит разрушение интерференционной картины и, как следствие, большую однородность нагрева и улучшенные физико-механические свойства образцов.

Требуемую ширину полосы невозможно обеспечить, используя резонансную зону только одной собственной моды цилиндрического резонатора, в силу его большой добротности ($Q \sim 1000$). Перестройка частоты осуществляется возбуждением различных мод при соответствующем изменении магнитного поля. Анализ спектра собственных частот круглого волновода позволил выбрать в качестве рабочих пару мод TE_{23} и TE_{03} , критические частоты которых отличаются примерно на 2%, а наибольшее значение фактора возбуждения моды электронным пучком соответствует близким значениям радиуса электронного пучка в резонаторе. Для минимизации ослабления переменного магнитного поля корпус лампы и резонатор были изготовлены из нержавеющей стали толщиной около 1 мм, а для снижения омических потерь на внутреннюю поверхность резонатора методом электроформирования был нанесен тонкий слой меди. Расчеты показывают, что обе моды могут быть преобразованы в гауссовый пучок одним внешним квазиоптическим преобразователем с эффективностью 95%.

Для различных значений магнитного поля, соответствующих генерации мод TE_{03} (28.7 ГГц) и TE_{23} (28.1 ГГц), получены мощность 10 кВт и КПД 20%, совпадающие с расчетными значениями. Время переключения частот составило около 0.5 мс и, в перспективе, может быть уменьшено при оптимизации источника питания катушки подмагничивания. Экспериментально продемонстрирована возможность быстрой 100% модуляции мощности излучения на фиксированной частоте током дополнительного соленоида. Реализованный метод быстрого изменения частоты и мощности излучения может быть успешно применен и для более высокочастотных гиротронов, вплоть до субмиллиметрового диапазона частот.

Публикации

1. M.Yu.Glyavin, A.G.Luchinin, M.V.Morozkin. Technological gyrotron with the wide-band fast frequency sweeping Proceedings of the 8 International Workshop Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications N.Novgorod, 2011, p. 107-108

2. М.Ю.Глявин, А.Г.Лучинин, М.В.Морозкин. Технологический гиротрон с быстрым широкополосным переключением частоты. 21st Int. Crimean Conference "Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo'2011), Sevastopol, Ukraine, 12-16 September, 2011, ISBN 978-966-335-3511, p.323-324

1.6. Показана принципиальная возможность реализации непрерывной широкополосной гиро-ЛБВ диапазона миллиметровых волн. В первом эксперименте получена мощность около 3 кВт, мгновенная полоса 1 ГГц, усиление 25 дБ в гиро-ЛБВ с центральной частотой 30.5 ГГц. Эксперименты и результаты численного моделирования подтверждают возможность создания гиро-ЛБВ с уровнем мощности до 10 кВт и полосой усиления 5-10% даже в коротковолновой части миллиметрового диапазона.

Авторы: С.В. Самсонов, А.А. Богдашов, Г.Г. Денисов, А.Г. Еремеев, И.Г. Гачев, В.В. Холопцев, В.Ю. Иванов, Г.И. Калынова, С.Ю. Корнишин, В.Н. Мануилов, В.В. Масов, С.В. Мишакин, И.В. Плотников, Т.М. Смирнова

Аннотация. Для ряда важных научных и технических приложений (радиолокация высокого разрешения, телекоммуникационные системы, установки по получению многозарядных ионов и т.д.) необходимы широкополосные усилители миллиметрового диапазона длин волн с непрерывной или средней мощностью порядка 10 кВт. Наиболее адекватным типом усилителя для этих целей является гиротронная лампа бегущей волны (гиро-ЛБВ), работы по созданию которых активно ведутся в ряде лабораторий США, КНР и других стран. Большинство положительных результатов в данных лабораториях

получены для giro-ЛБВ, работающих на основном циклотронном резонансе, в которых для обеспечения стабильного усиления с высоким коэффициентом используются волноводы, выполненные из материалов, обеспечивающих сильные (до 70-100 дБ) «холодные» потери. В ИПФ РАН развивается альтернативная концепция реализации giro-ЛБВ, основанная на использовании волноводов с винтовой гофрировкой поверхности. Данные giro-ЛБВ работают на второй гармонике циклотронной частоты и не требуют введения дополнительных поглотителей при умеренном (20-25 дБ) коэффициенте усиления, что определяет их большую привлекательность для приложений и реализуемость при высоких уровнях непрерывной или средней мощности.

В 2011 году в ИПФ РАН был завершен очень важный этап многолетних исследований винтовых giro-ЛБВ, в результате которого впервые была продемонстрирована работа усилителя в непрерывном режиме с киловаттным уровнем выходной мощности. Важно отметить, что данный прибор выполнен в виде, готовом для пользователя, когда от потребителя требуется только подключение электричества, воды для охлаждения и источника усиливаемого СВЧ сигнала милливаттного уровня. Для создания необходимого магнитного поля в данной установке используется несверхпроводящий соленоид с масляным охлаждением, а входной СВЧ сигнал предварительно усиливается до мощности около 10 Вт с помощью обычной ЛБВ на спиральной замедляющей системе. В giro-ЛБВ используется электронный пучок с энергией частиц 21 кэВ током 0.85 А. Максимальная выходная мощность достигает 4 кВт на частоте 30.4 ГГц. При перестройке магнитного поля в пределах 2% полоса частот, в которой мощность превышает 1 кВт составляет 1.4 ГГц, а максимальная мгновенная полоса частот (при фиксированных параметрах всех источников питания кроме источника входного сигнала) составляет 1 ГГц при максимальной мощности около 3 кВт. Эксперименты и результаты численного моделирования подтверждают возможность создания giro-ЛБВ с уровнем мощности до 10 кВт и полосой усиления 5-10% даже в коротковолновой части миллиметрового диапазона.

Публикации

1. В.Л. Братман, Г.Г. Денисов, С.В. Самсонов, А.У. Кросс, А.Д.Р. Фелпс, В. Хе, «Высокоэффективные широкополосные giro-ЛБВ и giro-ЛОБ со спирально-гофрированными волноводами», Известия вузов. Радиофизика, 2007, т.50, №2, с.104-117.

2. S.V. Samsonov, G.G. Denisov, I.G. Gachev, G.I. Kalynova, V.N. Manuilov, S.V. Mishakin, Yu.V. Bykov, A.G. Ereemeev, V.V. Holoptsev “Development of helical-waveguide gyro-TWT and gyro-BWO”, The 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Busan, Korea, September 21-25, 2009, Conf. Proceedings, p.09030269.

3. S.V. Samsonov, A.A. Bogdashov, G.G. Denisov, A.G. Ereemeev, I.G. Gachev, V.V. Holoptsev, V.Yu. Ivanov, G.I. Kalynova, S.Yu. Kornishin, V.N. Manuilov, V.V. Maslov, S.V. Mishakin, I.V. Plotnikov, T.M. Smirnova, “Development of Helical-Waveguide Gyro-TWT at IAP”, Proc. of 8th Int. Workshop “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications”, Nizhny Novgorod – St. Petersburg, Russia, July 9-16, 2011, pp. 123-124.

1.7. Предложена новая концепция плазменного компрессора для получения релятивистки сильных импульсов с длительностью вплоть до одного оптического периода поля. Механизм компрессии обусловлен нестационарной трехмерной самофокусировкой сверхсильного лазерного импульса в прозрачной плазме при возбуждении плазменной волны с периодом, превышающим длительность фемтосекундного импульса.

Авторы: А.А. Балакин, А.Г. Литвак, В.А. Миронов, С.А. Скобелев

Аннотация. Предложен новый метод сжатия лазерных импульсов вплоть до одного оптического периода поля мульти-петлеватого уровня мощности. Механизм укорочения лазерного импульса принципиально связан с нестационарностью процесса самофокусировки пространственно ограниченного волнового пакета при возбуждении кильватерной плазменной волны с периодом, превышающим первоначальную длительность лазерного импульса. Самокомпрессия лазерного импульса имеет место при выполнении следующих условий: а) первоначальный размер пучка должен превышать плазменную длину волны ($r_0 > c/\omega_p$); б) первоначальная длительность лазерного импульса должна быть меньше периода плазменной волны ($\tau < 2\pi/\omega_p$). Как показали результаты численного моделирования лазерный импульс с начальными параметрами: $\tau = 53$ фс (20 периодов поля), $a_0 = 2.0$, $\lambda = 0.8$ мкм, $r_0 = 180$ мкм, с мощностью 10 ПВт сжимается в результате самовоздействия вплоть до 1.5 периода поля на выходе нелинейной среды с длиной в 5 рэлеевских длин (59 см) и концентрацией плазмы $n_e \approx 7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Эффективность данного метода составляет 25 %. Средняя частота лазерного импульса уменьшается на 25%, а средняя ширина спектра увеличилась в 11 раз. Длительность спектрально-ограниченного импульса, соответствующая спектру сжатого импульса, составляет один период поля. Проведен анализ влияния шланговой неустойчивости на процесс укорочения импульса. Показано, что данная неустойчивость практически не влияет на процесс укорочения лазерного импульса для широкого класса начальных условий, т. к. длина на которой происходит заметное расслоение импульса как в продольном, так и в поперечном направлении превышает длину, на которой достигается компрессия импульса. Неустойчивость приводит лишь к незначительному уменьшению степени сжатия импульса и ухудшению структуры импульса.

Публикации

1. A.A. Balakin, A.G. Litvak, V.A. Mironov, and S.A. Skobelev, Self-compression of relativistically strong femtosecond laser pulses during the excitation of plasma wake wave, Phys.Rev.Lett. 2011 (to be published)

1.8. Показано, что перераспределение циклотронного излучения по частоте, вызванное релятивистским эффектом Доплера, приводит к эффективному выходу гирорезонансных фотонов из глубоких слоёв атмосфер нейтронных звёзд и магнитных белых карликов. Установлены изменения профиля циклотронной линии, возникающие вследствие перераспределения фотонов по частоте и поляризации вакуума в сильном магнитном поле. Рассчитана сила давления гирорезонансного излучения и оценён темп потери массы одиночных магнитных белых карликов и нейтронных звёзд, для которых возможно истечение плазмы под действием циклотронного излучения.

Авторы: Гарасёв М.А., Деришев Е.В., Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В.

Аннотация: Эффекты частотного перераспределения играют большую роль при переносе излучения в атмосферах звёзд, особенно в окрестности спектральных линий. В то время как для атомных и ионных линий существует большое количество работ, посвященных рассмотрению физических механизмов перераспределения, для гирорезонансного излучения в атмосферах компактных звёзд такие эффекты детально ещё не были исследованы для значительной области параметров. Среди механизмов, влияющих на выход фотонов из гирорезонанса, основную роль играют релятивистский эффект Доплера, эффект отдачи и радиационное или столкновительное уширение линии [Гарасёв М. А., Деришев Е. В., Кочаровский Вл. В., Письма в астрон. журнал, 2008, т. 34,

с. 339]. Механизмы перераспределения гирорезонансных фотонов по частоте качественно отличаются от механизмов перераспределения в атомных и ионных линиях. Из-за одномерного характера движения электронов в замагниченной плазме выход фотонов из линии за счет нерелятивистского эффекта Доплера сильно подавлен по сравнению с аналогичным процессом, происходящим в атомных или ионных линиях, где движение частиц является трёхмерным [Железняков В. В., Литвинчук А. А., Астрон. журнал, 1987, т. 25, с. 522].

Нами была исследована динамика частотного перераспределения гирорезонансных фотонов по частоте в зависимости от параметров атмосферной плазмы, как с помощью аналитических оценок, так и с помощью моделирования процессов переноса излучения методом Монте-Карло. Было показано, что перераспределение фотонов по частоте в циклотронной линии приводит к значительному увеличению (на порядки) вероятности выхода фотонов с больших оптических глубин. Излучение, выходящее из атмосферы звезды, собирается с большого интервала оптических глубин, различающихся в десятки и сотни раз. Это делает формирование циклотронных особенностей в значительной мере не локальным, так что в них содержится информация о структуре и параметрах довольно глубоких слоёв атмосферы компактных звёзд. Главным физическим эффектом, ответственным за выход фотонов из гирорезонанса, оказался релятивистский эффект Доплера. Он отвечает за существование двух различных резонансных значений скоростей электронов, при которых возможно резонансное рассеяние, так что фотон может претерпевать значительные скачкообразные изменения в коэффициенте поглощения в результате рассеяния на быстрых электронах, скорость которых относительно велика в сравнении с характерной тепловой скоростью. Установлена схожесть проявления частотного перераспределения в гирорезонансной линии в атмосферах компактных звёзд с перераспределением в сильных атомных и ионных линиях в атмосферах звёзд главной последовательности.

В результате численного моделирования установлено, что распределение фотонов по длинам свободного пробега в результате перераспределения гирорезонансного излучения по частоте приобретает длинный степенной хвост, тянущийся вплоть до длины свободного пробега нерезонансных фотонов из континуума. Значение этой длины может на много порядков превышать характерную длину свободного пробега резонансных фотонов. Наличие такого степенного хвоста приводит к аномальной диффузии фотонов в пространстве. Фактически движение фотонов представляет собой один из видов т.н. полётов Леви, при которых основное смещение происходит не за счёт многочисленных случайных блужданий с небольшим шагом, а за счет редких скачков на большие расстояния. Таким образом, даже редкие события перераспределения фотона из центра линии в её край существенно изменяют динамику переноса излучения.

С помощью численного решения уравнений переноса излучения с учетом эффектов частотного перераспределения рассчитана сила давления гирорезонансного излучения и определена зона параметров, в которой возможно возникновение циклотронного ветра. Оценен связанный с ним темп потери массы. Полученные результаты свидетельствуют, что циклотронный ветер возможен в широкой области параметров магнитоактивной плазмы, отвечающей ряду реально наблюдаемых астрономических объектов, для которых оцененный темп потери массы позволяет ожидать значительную перестройку их атмосфер. Наиболее перспективными объектами для исследований наблюдательных проявлений циклотронного ветра являются молодые нейтронные звезды в остатках сверхновых (ССО) и наиболее экстремально замагниченные белые карлики (например, GD 229, HE 1043-0502, EUVE J0317-855 и др.).

Публикации

1. Гарасёв М.А., Деришев Е.В., Кочаровский Вл.В. Влияние частотного перераспределения на перенос гирорезонансных фотонов в атмосферах компактных звёзд.// Изв. вузов. Радиофизика, 2010, т. 53, с.757-765
2. Гарасев М.А., Деришев Е.В., Кочаровский Вл.В. Статистика частотного перераспределения для гирорезонансного излучения в атмосферах компактных звёзд.// Письма в астрономический журнал, 2011, т. 37, с. 761-768
3. Garasyov M., Derishev E., Kocharovsky V. and Kocharovsky Vl. Spectral redistribution of gyroresonant photons in magnetized atmospheres of isolated compact stars.// Astronomy & Astrophysics, 2011, v. 531, p. L14

1.9. Предложена и развита самосогласованная нелинейная модель функционирования магнитосферного циклотронного мазера в режиме лампы обратной волны. На основе этой модели объяснено происхождение и рассчитаны количественные характеристики хоровых ОНЧ излучений как с повышающейся, так и с понижающейся частотой. Результаты расчетов хорошо согласуются с данными наземных и спутниковых наблюдений, в том числе недавних наблюдений на спутниках Cluster в области генерации хоровых излучений в магнитосфере Земли.

Авторы: А. Г. Демехов, В. Ю. Трахтенгерц (ИПФ РАН)

Аннотация. Одним из наиболее ярких видов дискретных электромагнитных излучений в околоземном космическом пространстве являются т.н. хоровые излучения в ОНЧ диапазоне (1-10 кГц), генерируемые в свистовой моде вследствие циклотронной неустойчивости энергичных электронов и представляющие собой квазимонохроматические волновые пакеты с быстро изменяющейся частотой. Известно, что эти сигналы генерируются в малой окрестности вершины геомагнитной силовой линии (длина области генерации вдоль магнитного поля 2-5 тыс. км). Малая длина области генерации, большой инкремент и быстрый дрейф частоты хоровых излучений могут быть объяснены в рамках предложенной В. Ю. Трахтенгерцем в 1995 г. модели, основанной на переходе плазменного магнитосферного циклотронного мазера в режим лампы обратной волны (ЛОВ). Этот режим, представляющий собой абсолютную неустойчивость свистовых волн, может реализоваться при наличии достаточно резкого перепада (ступеньки) на функции распределения энергичных электронов по продольным скоростям, когда волна пространственного заряда является слабозатухающей. В свою очередь, подобная деформация функции распределения образуется при циклотронном взаимодействии электронов в неоднородном магнитном поле с шумовыми излучениями, частотный спектр которых имеет достаточно резкую верхнюю границу, и такая ситуация возникает в магнитосфере естественным путем в процессе циклотронной генерации шумовых ОНЧ излучений. В работе [1] получена упрощенная система нелинейных уравнений, описывающих динамику магнитосферной ЛОВ в предположении малого КПД взаимодействия волн и частиц. В работе [2] проанализировано влияние неоднородности магнитного поля на нелинейную динамику абсолютной неустойчивости свистовых волн в магнитоактивной плазме (режим лампы обратной волны -- ЛОВ) при наличии ступенчатой деформации на функции распределения энергичных электронов по скоростям. Показано, что неоднородность оказывает принципиальное влияние на динамику спектра возбуждаемых волн в случае, когда длина системы много больше размера, определяющего линейную стадию режима ЛОВ. При развитии неустойчивости вблизи центрального сечения магнитной ловушки (именно такая ситуация типична для свистовых волн в магнитосфере Земли), с увеличением превышения порога генерации

происходит не только переход от стационарной генерации к периодической и далее к стохастической генерации, что характерно и для случая однородной среды, но и разбиение генерируемого излучения на отдельные волновые пакеты (дискретные элементы) с повышающейся частотой. Параметры этих элементов (характерный интервал их следования и скорость дрейфа частоты), найденные в результате моделирования, неплохо соответствуют параметрам хоровых ОНЧ излучений, наблюдаемых в магнитосфере Земли. Таким образом, предложенная ранее модель формирования хоровых излучений, основанная на переходе магнитосферного циклотронного мазера в режим ЛОВ, получила подтверждение на основе самосогласованной нелинейной теории. В работе [3] исследованы механизмы формирования понижающихся тонов в динамическом спектре хоровых ОНЧ излучений в магнитосфере. Продемонстрировано, что генерация понижающихся тонов имеет место в случае, когда область генерации смещается от экваториальной плоскости (минимума геомагнитного поля) в сторону, противоположную движению энергичных электронов. При этом резонансные электроны в процессе генерации движутся в сторону уменьшения геомагнитного поля, поэтому их продольная скорость увеличивается, что соответствует уменьшению частоты циклотронного резонанса. В качестве двух механизмов смещения области генерации от экватора рассматриваются (1) увеличение линейного инкремента неустойчивости (например, за счет роста концентрации энергичных частиц) и (2) сохранение фазовой группировки частиц, возвращающихся в область генерации за счет баунс-осцилляций. Показано, что оба эти механизма могут привести к формированию понижающихся тонов, причем свойства генерируемых излучений (скорость дрейфа частоты, характерный интервал следования элементов) оказываются различными, и параметры наблюдаемых хоровых излучений больше соответствуют второму механизму. Обсуждаются условия сохранения фазовой группировки частиц при баунс-осцилляциях. По-видимому, данный механизм может действовать в случае, когда размер области генерации вдоль магнитного поля близок к характерной длине баунс-осцилляций резонансных электронов, что реализуется при достаточно высокой плотности холодной плазмы в области генерации. Согласно расчетам, элементы с понижающейся частотой формируются на краю области генерации; это согласуется с наблюдениями на спутнике OGO 5, показывающими отсутствие таких событий в непосредственной близости от экватора.

Публикации

1. Демехов А. Г., Трахтенгерц В. Ю. О динамике магнитосферного циклотронного КНЧ-ОНЧ мазера в режиме лампы обратной волны. I. Исходные уравнения и результаты в приближении однородного магнитного поля // Изв. вузов Радиофизика. 2005. Т. 48, №9. С. 719-729.

2. Демехов А.Г., Трахтенгерц В.Ю. О динамике магнитосферного циклотронного КНЧ-ОНЧ мазера в режиме лампы обратной волны. II. Влияние неоднородности магнитного поля // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т.51, №11. С.977-987.

3. Демехов А.Г. О генерации ОНЧ излучений с повышающейся и понижающейся частотой в магнитосферном циклотронном мазере в режиме лампы обратной волны // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т.53, №11. С.679-694.

1.10. Экспериментально на высоком уровне мощности продемонстрировано существенное увеличение эффективности и коэффициента усиления в системах пассивной компрессии СВЧ импульсов на основе резонансных линий задержки. Увеличение достигнуто путем одновременного изменения фазы СВЧ генератора и коэффициента связи с линией задержки с помощью разработанных электрически управляемых плазменных переключателей. В экспериментах с активным компрессором SLED II Стэнфордского

ускорителя на частоте 11,4 ГГц достигнуто увеличение эффективности компрессии и коэффициента усиления мощности на 37%. Для входной мощности 20 МВт получены сжатые импульсы прямоугольной формы длительностью 173 нс и мощностью 112 МВт с энергетической эффективностью компрессии до 72%.

Авторы: А.Л. Вихарев, А.М. Горбачев, О.А. Иванов, В.А. Исаев, М.А. Лобаев (Институт прикладной физики РАН), S.G. Tantawi, J.R. Lewandowski (SLAC National Accelerator Laboratory, USA), J.L. Hirshfield (Yale University and Omega-P Inc, USA)

Аннотация: В существующем пассивном компрессоре SLED-II накопительная линия задержки связана с СВЧ генератором с помощью диафрагмы с постоянным коэффициентом отражения. При этом компрессия СВЧ импульсов осуществляется путем изменения фазы СВЧ генератора в конце импульса накачки. Такая система не позволяет добиться высокого коэффициента усиления мощности при высокой энергетической эффективности. Расчеты показывают, что эффективность компрессии в системах на основе резонансных линий задержки может быть существенно увеличена при одновременном изменении фазы СВЧ генератора и коэффициента связи с линией задержки. Таким образом, замена диафрагмы на активный элемент (переключатель) позволяет создать активный компрессор SLED-II. Основным элементом активного компрессора является переключатель, позволяющий изменять коэффициент отражения (связи) в необходимых пределах.

Нами разработан плазменный переключатель, обеспечивающий изменение коэффициента отражения в диапазоне от $R_0 = 0.8$ до $R_d = 0.2$ оптимальное для параметров компрессора SLED-II, используемого на Стэнфордском ускорителе заряженных частиц. Изменение коэффициента связи нагрузки с накопительной линией задержки достигается путем резонансного просветления коммутатора при создании плазмы в расположенных в резонаторе переключателя газоразрядных трубках.

Проведено испытание двухканального компрессора SLED-II, состоящего из 2-х плазменных переключателей и 2-х тридцатиметровых резонансных линий задержки на низком мегаваттном уровне мощности. В экспериментах на частоте 11,4 ГГц достигнуто увеличение эффективности компрессии и коэффициента усиления мощности на 37%. Для входной мощности 20 МВт получены сжатые импульсы прямоугольной формы длительностью 173 нс и мощностью 112 МВт с энергетической эффективностью компрессии до 72%.

Публикации

1 A.L. Vikharev, O.A. Ivanov, A.M. Gorbachev, M.A. Lobaev, V.A. Isaev, S.G. Tantawi, J.R. Lewandowski, J.L. Hirshfield, X-band active SLED-II RF pulse compressor with plasma switches // Phys. Rev. ST Accel.&Beams, **14**, 2011

1.11. Предложено и реализовано несколько разновидностей электронных мазеров, в которых возбуждение волны на высокой гармонике частоты собственных осцилляций электронов обеспечивается самовозбуждением волны на низкой гармонике и происходит при относительно низком токе. В слаборелятивистском мазере на циклотронном резонансе с параметрами электронного пучка 60 кэВ / 5 А получено совместное возбуждение двух квазикритических мод на второй и четвертой циклотронных гармониках на частотах 37.5 ГГц и 75 ГГц соответственно при величине рабочего тока примерно в 100 раз меньше стартового порога одномодового самовозбуждения высокочастотной моды. В мазере на свободных электронах реализованы двухволновые режимы генерации с возбуждением низкочастотной волны на частоте 24 ГГц (на основной

гармонике баунс-частоты) совместно с волнами, возбуждавшимися с мегаваттным уровнем мощности при работе на второй гармонике баунс-частоты на удвоенной (48 ГГц) или утроенной (72 ГГц) частотах. Развиваемые варианты самовозбуждающихся умножителей открывают новые возможности для повышения частоты генерации электронных мазеров.

Авторы: И.В.Бандуркин, В.Л. Братман, А.Б. Волков, Н.Ю.Песков, А.В.Савилов, С.В. Самсонов (ИПФ РАН, Нижний Новгород), А.К.Каминский, Э.А.Перельштейн, С.Н.Седых (Объединенный институт ядерных исследований, Дубна)

Аннотация. Перспективным методом повышения частоты электронных мазеров (МЦР и МСЭ) является переход к работе на высоких гармониках частоты собственных колебаний электронов (циклотронной частоты, частоты баунс-осцилляций в периодическом поле ондулятора). При этом при умеренных осцилляторных скоростях частиц рост номера рабочей гармоники сопровождается быстрым ослаблением электронно-волнового взаимодействия, что приводит к росту стартового тока генератора, а также к опасности возбуждения низкочастотных паразитных колебаний на низких гармониках. Одним из путей решения этих проблем является реализация электронных мазеров с умножением частоты, в которых возбуждение высокочастотной (ВЧ) волны на высокой гармонике происходит при относительно низком токе и обеспечивается самовозбуждением низкочастотной (НЧ) волны на низкой гармонике. Несколько разновидностей таких двухволновых мазеров было реализовано в экспериментах.

В слабoreлятивистском мазере на циклотронном резонансе (гиротроне) с параметрами электронного пучка 60 кэВ / 5 А получено совместное возбуждение двух квазикритических мод на второй и четвертой циклотронных гармониках на частотах 37.5 ГГц и 75 ГГц соответственно. Для реализации такого режима требовалось обеспечить в одном резонаторе одновременное выполнение двух резонансных условий для взаимодействия пучка с НЧ и ВЧ волнами. В эксперименте использован резонатор с азимутальной восьмизаходной гофрировкой, в котором было достигнуто совместное возбуждение квазикритических мод $TE_{2,2}$ и $TE_{4,3}$. Гофрировка обеспечивала расщепление ВЧ моды $TE_{4,3}$ вследствие связи двух вырожденных мод противоположного вращения. При этом одна из собственных частот была ровно в 2 раза больше частоты НЧ моды. Эксперимент подтвердил возможность двухчастотной генерации в исследуемой системе. Измеренные частоты НЧ и ВЧ излучения отличаются ровно в два раза, а диаграмма направленности ВЧ излучения на выходе хорошо согласуется с диаграммой моды $TE_{4,3}$. Мощность сигнала на умноженной частоте превышала 100 Вт, а ее зависимость от величины электронного тока в соответствии с теорией была близка к квадратичной. Важно подчеркнуть, что селективное возбуждение пространственно развитой моды на четвертой циклотронной гармонике удалось достичь в условиях, когда рабочий ток на два порядка меньше стартового тока самовозбуждения этой моды.

В релятивистском (850 кэВ/150 А) мазере на свободных электронах были реализованы двухволновые режимы генерации с возбуждением НЧ волны $TE_{1,1}$ на частоте 24 ГГц (на основной гармонике баунс-частоты) совместно с ВЧ волной $TE_{2,1}$, которая возбуждалась на второй гармонике баунс-частоты либо на удвоенной частоте НЧ волны (48 ГГц), либо на утроенной частоте этой волны (72 ГГц). Оптимизация генератора (по мощности излучения на умноженных частотах), а также перестройка частоты высокочастотной волны (то есть переход с удвоения частоты к утроению) обеспечивались перестройкой величины магнитного поля ондулятора. Это приводило к изменению поступательной скорости электронов и, соответственно, к изменению частоты, соответствующий электронно-волновому резонансу на второй гармонике баунс-частоты. На удвоенной частоте (48 ГГц) достигнута мощность около 2 МВт, а на утроенной (72 ГГц) - около 0,5 МВт, что хорошо согласуется с численными расчетами. Следует

подчеркнуть, что одномодовое возбуждение таких ВЧ волн в данной системе невозможно вследствие как отсутствия обратной связи на этих частотах, так и слабости электронно-волнового взаимодействия на второй баунс-гармонике. Однако наличие группировки электронов на частоте НЧ моды (и на гармониках этой частоты) делает возможным стимулированное излучение ВЧ волн.

Публикации

1. I.V.Bandurkin, V.L.Bratman, A.V.Savilov et al. Experimental study of a fourth-harmonic gyro multiplier. *Physics of Plasmas*, 2009, vol.16, p.070701.

2. D.A. Constable, ...A.V. Savilov, V.L. Bratman and I.V. Bandurkin. Numerical simulations of a co-harmonic gyrotron. *Journal of Physics D: Applied Physics* (submitted in 2011).

3. И.В.Бандуркин, А.К.Каминский, Э.А.Перельштейн, Н.Ю.Песков, А.В.Савилов, С.Н.Седых. Мощный МСЭ-умножитель с брэгговским резонатором, работающий в коротковолновой части миллиметрового диапазона. *Письма в ЖТФ* (в печати).

1.12. Теоретически показана возможность использования эффектов самоиндуцированной прозрачности, возникающих при циклотронном взаимодействии мощных коротких электромагнитных импульсов с равновесной плазмой или первоначально прямолинейными электронными пучками, для нелинейной компрессии импульсов с 2.5-3 кратным увеличением пиковой мощности, а при встречном распространении – для управления групповой скоростью импульсов вплоть до их полной остановки и формирования неподвижных солитонов.

Авторы: Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.С. Сергеев

Аннотация: В оптике хорошо известны эффекты самоиндуцированной прозрачности, возникающие при распространении коротких (в масштабе релаксационных времен) световых импульсов в двухуровневой неинвертированной среде. Классическим аналогом описанных эффектов может служить взаимодействие микроволновых импульсов с первоначально прямолинейным электронным потоком в условиях циклотронного резонанса. В этом случае при определенной интенсивности входного сигнала циклотронное поглощение сменяется эффектом самоиндуцированной прозрачности, когда входной импульс распространяется практически без изменения профиля, формируя солитон, амплитуда и длительность которого жестко связаны со скоростью распространения. В определенной области параметров этот процесс сопровождается значительной 2х-3х кратной компрессией начального импульса, что представляет определенный практический интерес для генерации мульти-гигаваттных пикосекундных микроволновых импульсов. Поскольку скорость солитонов лежит между невозмущенной групповой скоростью излучения и поступательной скоростью частиц, в случае взаимодействия со встречным электронным потоком нетривиальным эффектом является возможность существенного замедления или полной остановки электромагнитного импульса. Указанный эффект может быть использован при создании линий задержки или для последующего сложения нескольких импульсов. В случае длинного квазистационарного начального сигнала найдена область параметров, в которой падающее излучение трансформируется в периодическую последовательность коротких импульсов, что может быть использовано для создания модуляторов СВЧ-излучения.

Публикации

1. N.S. Ginzburg, I.V. Zotova, A.S. Sergeev, «Self-induced transparency and electromagnetic pulse compression in a plasma or an electron beam under cyclotron resonance conditions», Phys. Rev. Lett. 105, 265001 (2010).

2. Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.С. Сергеев, «Самоиндуцированная прозрачность, компрессия и остановка электромагнитных импульсов при взаимодействии с пучками невозбужденных классических осцилляторов», ЖЭТФ. Том 140, вып. 5, стр. 890-899.

1.13. Разработан и изготовлен двухдиапазонный (3 и 2 мм) измеритель атмосферного поглощения, предназначенный для мониторинга влагосодержания атмосферы и водозаписа облаков.

Авторы: И.И. Зинченко, В.И. Носов, П.Л. Никифоров, Л.И. Федосеев, А. Швецов, О.С. Большаков (ИПФ РАН).

Аннотация. Измеритель предназначен для оценки поглощения в атмосфере на волнах 2 мм и 3 мм для целей непрерывного мониторинга влагосодержания атмосферы и водозаписа облаков. В частности, планируется установка этого прибора на плато Суффа в районе площадки радиотелескопа РТ-70. Ранее авторами было показано, что одновременные измерения в двух окнах прозрачности атмосферы на миллиметровых волнах позволяют оценивать оба указанных параметра.

Измеритель представляет собой радиометрическую систему, включающую в себя два радиометра (в общем корпусе) на частоты (84-99) ГГц и (132-148) ГГц, опорно-поворотное устройство и систему управления, сбора и обработки данных на базе персонального компьютера и модуля USB-4716 (рис. 1). Приемник диапазона (84-99) ГГц выполнен по схеме прямого усиления с детектированием на основной частоте. Модулятор на входе приемника выполнен на основе цепочек последовательно-параллельно включенных диодов с барьером Шоттки (ДБШ), установленных в волноводе основного сечения. Шумовая температура приемника 1300 К.

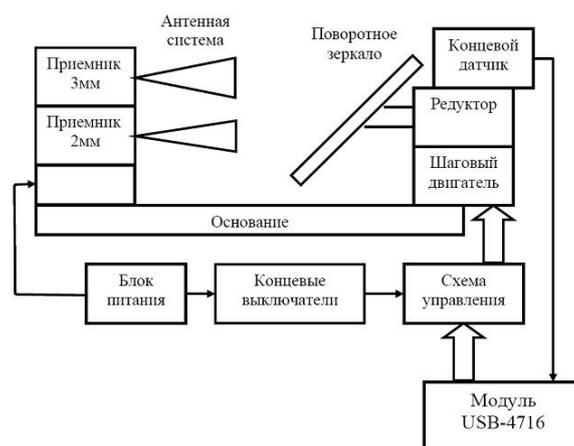


Рис. 1. Общий вид измерителя со снятым кожухом и его функциональная схема.

Твердотельный приемник радиометра диапазона (132-148) ГГц выполнен по супергетеродинной схеме и включает в себя гетеродин на диоде Ганна, балансный смеситель на ДБШ и УПЧ диапазона (4-8) ГГц. Модулятор аналогичен описанному выше. Шумовая температура приемника 6300 К. Управление модуляторами и синхронный сбор

данных осуществляются с помощью ПК через модуль USB-4716. Частота модуляции – около 36 Гц.

Опорно-поворотное устройство состоит из опорного каркаса для установки модуля радиометров, плоского поворотного зеркала и системы привода зеркала на базе шагового двигателя. Кожух для защиты от климатических воздействий изготовлен из нержавеющей стали и имеет радиопрозрачное фторопластовое окно. Пределы изменения угла места наблюдений 0-90 градусов. Управление приводом по заданной программе осуществляется через модуль USB-4716.

Система управления, сбора и обработки данных обеспечивает полностью автоматическую работу комплекса в режиме циклических наблюдений в заданное время.

Публикации

1. И.И. Зинченко, В.И. Носов, П.Л. Никифоров, Л.И. Федосеев, А.А. Швецов, О.С. Большаков. Двухчастотный измеритель атмосферного поглощения в миллиметровом диапазоне волн. Всероссийская радиоастрономическая конф. (ВРК-2011). С.-Петербург, 17-21 октября 2011. Тезисы докл., с. 108

1.14. Найден интеграл парных электрон-ионных соударений в кинетическом уравнении для одночастичной функции распределения по дрейфовым координатам и скоростям электронов в полях интенсивных электромагнитных волн, в которых осцилляторная скорость электронов значительно превышает тепловую. Учтён принципиально важный эффект кулоновское притяжение осциллирующего в сильном высокочастотном поле электрона к иону в процессе многократного возвращения к нему. Этот эффект приводит к существенному увеличению сечения столкновений электронов с ионами в сильных лазерных полях, возрастанию джоулевых потерь в плазме, генерации быстрых электронов при столкновениях, росту эффективности и полосы частот генерации тормозного излучения.

Авторы: А.А. Балакин, Г.М. Фрайман

Аннотация. Найден интеграл парных электрон-ионных соударений в кинетическом уравнении для одночастичной функции распределения по дрейфовым координатам и скоростям электронов в полях интенсивных электромагнитных волн. Интеграл получен исходя из первых принципов (уравнения Лиувилля для N частиц) при учёте стохастической динамики электронов при рассеянии. Выражение для интеграла столкновений в линейно поляризованном поле можно представить в виде интегрального оператора

$$St_{ei}[f] = \int f(p') w_{ei}(k) e^{ik(p-p')/p_{osc}} d^3 p' d^3 k$$

действующего на функцию распределения электронов $f(p)$ по дрейфовым скоростям. Ядро интеграла столкновений w_{ei} записывается в виде интеграла

$$w_{ei} = v\alpha \int \frac{J_0(k_\perp \sin\varphi) \cos(k_z(1 + \cos\varphi)) - 1}{1 + \cos\varphi} d\varphi$$

где ось z совпадает с направлением электрического поля электромагнитной волны, $v = n_i e^4 Z^2 m_e / 2\pi p_{osc}^3$, $\alpha(p) \propto p_{osc} / p \gg 1$. Интеграл имеет больцмановский вид и описывает столкновения как с малой, так и с большой передачей импульса.

Анализ данного выражения при малых $k \ll 1$ и больших $k \gg 1$ позволяет условно выделить в интеграле столкновений члены, отвечающие диффузии в пространстве скоростей и источнику быстрых частиц

$$St_{ei}[f] = \frac{\partial^2 B_{ij} f(p)}{\partial p_i \partial p_j} + \frac{2\nu}{p_{\perp}^3} \int \alpha f(p_0) d^3 p_0, \quad B_{ij} = \frac{\pi^2 \alpha n_i e^4 Z^2 m}{p_{osc}} \left(\delta_{ij} + \frac{p_{osc,i} p_{osc,j}}{p_{osc}^2} \right).$$

В отличие от традиционного интеграла столкновений в сильных полях (в диффузионной форме), предложенного более 40 лет назад В.П. Силиным, найденное выражение учитывает новый, принципиально важный эффект – кулоновское притяжение осциллирующего в сильном высокочастотном поле электрона к иону в процессе многократного возвращения к нему. Этот эффект приводит к существенному увеличению сечения столкновений электронов с ионами в сильных лазерных полях, возрастанию эффективности джоулевых потерь в плазме, генерации быстрых электронов при столкновениях, росту эффективности и полосы частот тормозного излучения.

Публикации

1. A.A. Balakin and G.M. Fraiman, Electron-ion collision operator in strong electromagnetic fields // EPL, **93**, 35001 (2011).