

Российская
академия наук

Институт общей физики
им. А.М. Прохорова

ТРУДЫ ИОФАН

Том 72

Плазменная
электроника

Наука

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ТРУДЫ
ИНСТИТУТА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
им. А. М. Прохорова**

Главный редактор Трудов ИОФАН
академик РАН И. А. ЩЕРБАКОВ

Том **72**

**Плазменная
электроника**

Ответственный редактор тома
доктор физико-математических наук, профессор
Н. Г. Гусейн-заде



МОСКВА НАУКА 2016

УДК 533.533.9
ББК 22.333
Т78

Заместитель главного редактора Трудов ИОФАН
кандидат физико-математических наук *Т.Б. Воляк*

Рецензенты

доктор физико-математических наук, профессор *В.П. Милантьев*
доктор физико-математических наук, профессор *Л.С. Кузьменков*

Труды Института общей физики им. А.М. Прохорова / Ин-т общей физики им. А.М. Прохорова РАН. – М. : Наука, 1986– . – ISSN 0233-9390.

Т. 72 : Плазменная электроника / отв. ред. Н.Г. Гусейн-заде. – 2016. – 157 с. – ISBN 978-5-02-039968-6.

В сборнике представлен цикл экспериментальных и теоретических работ по современным проблемам плазменной электроники, генерации, излучению и распространению электромагнитных волн.

Для научных сотрудников, инженеров, аспирантов и студентов старших курсов, специализирующихся в области физики плазмы и электроники.

Proceedings of the Prokhorov General Physics Institute / Prokhorov General Physics Inst. RAS. – Moscow : Nauka, 1986– . – ISSN 0233-9390.

Vol. 72 : Plasma Electronics / Ed. by N.G. Gusein-zade. – 2016. – 157 p. – ISBN 978-5-02-039968-6.

A series of experimental and theoretical studies concerning the modern problems of plasma electronics, generation, radiation, and propagation of electromagnetic waves is presented.

The proceedings are intended for experts in the field of plasma physics and electronics, as well as for students and post graduate students involved in the corresponding fields.

ISBN 978-5-02-039968-6.

- © Продолжающееся издание «Труды Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН», 1986 (год основания), 2016
- © Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 2016
- © Коллектив авторов, 2016
- © ФГУП Издательство «Наука», редакционно-издательское оформление, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Кузелев М.В., Рухадзе А.А.

Плазменные волноводы в отсутствие внешнего магнитного поля..... 3

Кузелев М.В., Орликовская Н.Г.

Поверхностные волны в плавно неоднородной плазме..... 43

Карташов И.Н., Кузелев М.В.

Черенковская неустойчивость замагниченной пучково-плазменной системы
с учетом разброса электронов пучка по импульсам 90

Карташов И.Н., Кузелев М.В.

Коллективный и одночастичный эффекты Черенкова в пространственно-
ограниченной системе вблизи полосы непрозрачности 105

Ернылева С.Е., Лоза О.Т.

Укорочение импульсов излучения в устройствах плазменной релятивистской
сильноточной СВЧ-электроники 118

Ернылева С.Е., Лоза О.Т.

Плазменный релятивистский СВЧ-усилитель шума с инверсной геометрией 128

Литвин В.О., Лоза О.Т.

Плазменный сильноточный генератор мощных широкополосных
СВЧ-импульсов с магнитной самоизоляцией..... 134

Ульянов Д.К., Андреев С.Е., Алексеев И.С., Крымов Р.Р.

Широкополосная антенна для регистрации импульсов мощного
СВЧ-излучения 140

CONTENT

Kuzelev M.V., Rukhadze A.A.

Plasma waveguides in the absence of an external magnetic field3

Kuzelev M.V., Orlikovskaya N.G.

Surface waves in smoothly inhomogeneous plasma43

Kartashov I.N., Kuselev M.V.

Collective and one-particle Cherenkov effects in spatially bounded system near the nontransparency band.....90

Kartashov I.N., Kuselev M.V.

Cherenkov instability of magnetized beam-plasma system taking into account spread of beam electrons on impulses105

Ernyleva S.E., Loza O.T.

Microwave pulse shortening in plasma relativistic high-current microwave electronics...118

Ernyleva S.E., Loza O.T.

Plasma relativistic microwave noise amplifier with inverse configuration.....128

Litvin V.O., Loza O.T.

Plasma high-current generator of wideband high-power microwaves with magnetic self-insulation.....134

Ulyanov D.K., Andreev S.E., Alexeev I.S., Krymov R.R.

Broadband antenna for recording high-power microwave radiation pulses140

Кузелев М.В., Рухадзе А.А. **Плазменные волноводы в отсутствие внешнего магнитного поля** // Плазменная электроника. М.: Наука, 2016. (Труды ИОФАН; т. 72).

Последовательно излагается теория электромагнитных волн в волноводах с поперечно неоднородной плазмой в отсутствие внешнего магнитного поля. Получены дисперсионные уравнения для спектров волн в волноводах с различной геометрией плазменного заполнения: плазменный цилиндр, плазменная трубка, диэлектрический цилиндр в плазме, система из трубчатых плазм разной плотности. Рассмотрены как обычные, так и коаксиальные волноводы. Аналитически и численно определены частотные спектры и исследованы структуры полей электромагнитных волн разного типа — поверхностных, объемно-поверхностных, кабельных, электромагнитно-плазменных и электромагнитных.

Кузелев М.В., Орликовская Н.Г. **Поверхностные волны в плавно неоднородной плазме** // Плазменная электроника. М.: Наука, 2016. (Труды ИОФАН; т. 72).

Изложена теория поверхностных волн в холодной электронной плазме с плавными границами. Для различных геометрий и законов изменения плотности на границах плазмы получены дисперсионные уравнения поверхностных волн. Определены частоты поверхностных волн и декременты их бесстолкновительного затухания. Обнаружены и исследованы новые типы поверхностных волн, обусловленные размытостью границ плазмы. Учтены столкновения и дано обобщение на случай произвольного профиля плотности на границе плазмы.

Карташов И.Н., Кузелев М.В. **Черенковская неустойчивость замагниченной пучково-плазменной системы с учетом разброса электронов пучка по импульсам** // Плазменная электроника. М.: Наука, 2016. (Труды ИОФАН; т. 72).

Рассмотрена черенковская неустойчивость в полностью замагниченной однородной пучково-плазменной системе при наличии теплового разброса электронов пучка по импульсам. Тепловой разброс в пучке описывался как в рамках гидродинамического подхода, так и методом кинетического уравнения посредством задания функции распределения электронов по импульсам в виде максвелловского и полумаксвелловского распределений. Показано, что в системе (волноводе) с однородными поперечными профилями плотности пучка и плазмы возможны два режима пучково-плазменной неустойчивости: одночастичный и коллективный эффекты Черенкова (комптоновский и рамановский режимы), отличающиеся физическим механизмом и значениями инкрементов. Получены и проанализированы решения дисперсионных уравнений для этих и более общего режимов.

Карташов И.Н., Кузелев М.В. **Коллективный и одночастичный эффекты Черенкова в пространственно-ограниченной системе вблизи полосы непрозрачности** // Плазменная электроника. М.: Наука, 2016. (Труды ИОФАН; т. 72).

В линейном приближении рассмотрены пучковые неустойчивости типа коллективного и одночастичного вынужденного эффекта Черенкова, развивающиеся в продольно

ограниченной электродинамической системе вблизи ее полосы непрозрачности, т. е. в условиях, когда возбуждаемая пучком электромагнитная волна имеет нулевую групповую скорость. Получено дисперсионное уравнение, определяющее инкременты развития неустойчивости с учетом выхода излучения из электродинамической системы. Исследованы решения дисперсионного уравнения для различных параметров электронного пучка и электродинамической системы.

Ернылева С.Е., Лоза О.Т. **Укорочение импульсов излучения в устройствах плазменной релятивистской сильноточной СВЧ-электроники** // Плазменная электроника. М.: Наука, 2016. (Труды ИОФАН; т. 72).

Описаны механизмы укорочения СВЧ-импульсов мощностью $\sim 10^8$ Вт в источниках излучения, основанных на взаимодействии сильноточных релятивистских электронных пучков наносекундной длительности с заранее созданной плазмой. Основной причиной укорочения является встречный поток электронов через плазму, он приводит к кратному снижению погонного коэффициента усиления волны релятивистским пучком электронов, а также коэффициента отражения плазменной волны, обеспечивающей обратную связь в автогенераторе. Предложены пути устранения эффекта укорочения СВЧ-импульсов.

Ернылева С.Е., Лоза О.Т. **Плазменный релятивистский СВЧ-усилитель шума с инверсной геометрией** // Плазменная электроника. М.: Наука, 2016. (Труды ИОФАН; т. 72).

Представлены результаты численного моделирования мощного плазменного мазера — широкополосного СВЧ-усилителя шума. Конфигурация и параметры прибора выбраны с перспективой дальнейшей его реализации на практике для генерации импульсов с длительностью 3 нс и шириной спектра отдельного импульса 0.3–2 ГГц. В импульсно-периодическом режиме может быть получено излучение в непрерывном диапазоне от 2 до 12 ГГц со средними по диапазону мощностью 20 МВт и эффективностью по энергии импульса 6%.

Литвин В.О., Лоза О.Т. **Плазменный сильноточный генератор мощных широкополосных СВЧ-импульсов с магнитной самоизоляции** // Плазменная электроника. М.: Наука, 2016. (Труды ИОФАН; т. 72).

В модели крупных частиц проведены расчеты плазменного мазера, не имеющего сильного магнитного поля для транспортировки сильноточного релятивистского электронного потока. Продемонстрирована перестройка средней частоты излучения от 3 до 7 ГГц при ширине спектра отдельного импульса 2–3 ГГц. Мощность импульса излучения с длительностью до 70 нс равна 0.5–0.7 ГВт при КПД 4–6%.

Ульянов Д.К., Андреев С.Е., Алексеев И.С., Крымов Р.Р. **Широкополосная антенна для регистрации импульсов мощного СВЧ-излучения** // Плазменная электроника. М.: Наука, 2016. (Труды ИОФАН; т. 72).

Плазменный релятивистский генератор (ПРГ) на ускорителе Sinus 550-80 обладает рядом уникальных свойств: работа в режиме генерации одиночного импульса или в частотно-периодическом режиме (до 50 импульсов в секунду), генерация импульсов СВЧ-излучения длительностью до 80 нс с частотами излучения от 2 до 25 ГГц, генерация монохроматического излучения и излучения с широким спектром. Изменяя параметры эксперимента, в частности плотность плазмы, можно управлять как центральной частотой, так и шириной спектра.

Для исследования режимов работы ПРГ необходимо иметь подходящие средства регистрации СВЧ-излучения ПРГ. В данной статье с помощью САПР Ansoft HFSS 13.0 созданы численные модели антенн с различными геометрическими параметрами и предложена антенна с оптимальными параметрами для измерения спектров СВЧ-излучения в требуемом диапазоне частот на уровне мощности 50–100 МВт.

Сведения об авторах

Алексеев Иван Сергеевич

Московский технологический университет

Студент

E-mail: adriefym@gmail.com

Андреев Сергей Евгеньевич

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

Младший научный сотрудник

E-mail: funkmonk@rambler.ru

Ернылева Светлана Евгеньевна

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

Младший научный сотрудник

E-mail: ersvev@mail.ru

Литвин Виталий Олегович

Российский университет дружбы народов

Аспирант

E-mail: litiy-ltk@mail.ru

Лоза Олег Тимофеевич

1. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Начальник управления

2. Российский университет дружбы народов

Профессор

E-mail: oleg.loza@list.ru

Карташов Игорь Николаевич

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Доцент

E-mail: kartashov@ph-elec.phys.msu.ru, igorkartashov@mail.ru

Крымов Ринат Рамильевич

Московский технологический университет

Студент

E-mail: kr81828@gmail.com

Кузелев Михаил Викторович

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Профессор

E-mail: kuzelev@mail.ru

Орликовская Нино Григорьевна

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Физик

E-mail: orlikovskayang@gmail.com

Рухадзе Анри Амвросьевич

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

Главный научный сотрудник

E-mail: rukh@fpl.gpi.ru

Ульянов Денис Константинович

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

Заведующий лабораторией

E-mail: Ulyanov@fpl.gpi.ru

Труды ИОФАН

Редакционная коллегия

И.А. Щербаков, академик РАН, профессор, **главный редактор**

Т.Б. Воляк, к.ф.-м.н., заместитель главного редактора

С.В. Гарнов, д.ф.-м.н.

Е.М. Дианов, академик РАН, профессор

В.И. Конов, член-корреспондент РАН, профессор

В.Г. Михалевич, д.ф.-м.н., профессор

В.В. Осико, академик РАН, профессор

П.П. Пашинин, член-корреспондент РАН, профессор

Требования к оформлению рукописей для опубликования в Трудах ИОФАН

1. Рукопись, подготовленная в редакторе Microsoft Word, предоставляется в электронном виде и в виде распечатки (1 экз., через 1.5 интервала, поля стандартные, шрифт Times New Roman 12).
2. Необходимо представить **отдельными файлами исходные** файлы рисунков (org, jpg, tif, bmp или выполненных с помощью встроенного графического редактора Word).
3. В списке литературы указывать **всех авторов**. Для статей: авторы, название статьи, название журнала, год, том, номер и страницы от и до.
Для книг: авторы, название, город, издательство, год и полное число страниц.
Каждой ссылке должен быть присвоен свой номер.
4. Все физические и переменные величины набираются наклонным шрифтом, например $E = mc^2$, химические формулы — прямым шрифтом (C_2H_5OH).
5. В конце статьи должны быть представлены рефераты на русском и английском языках и название статьи и авторы на английском языке.
6. К каждой статье должны быть ключевые слова на русском и английском языках.
7. Ко всему тому должны быть
 - **на русском и английском языках** краткие аннотации (10–12 строк с указанием, для кого предназначен сборник) и содержание,
 - сведения об авторах (ФИО, место работы, должность, e-mail),
 - отзывы двух рецензентов (д.ф.-м.н.), один из которых может быть сотрудником ИОФ РАН (по 2 экз.).

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Пример оформления литературы

1. Лазерные фосфатные стекла / Под ред. М.Е. Жаботинского. М.: Наука, 1980. 352 с.
2. *Marezio M., Remeika J.P., Dernier P.D.* The crystal structure of the high pressure phase CaB_2O_2 // *Acta Cryst. B.* 1969. Vol. 25. P. 965–970.
3. *Strunz H.* Mineralogische Tabellen. S. Auflage, Leipzig: Akad. Verlagsgesellschaft, 1977.
4. *Ахметов С.Ф., Ахметова Г.Л., Коваленко В.С.* Термическое разложение редкоземельных алюмоборатов // *Кристаллогр.* 1978. Т. 23. С. 198–199.
5. *Ballman A.A.* Yttrium and rare-earth borates. US patent 3057677.9.10.1962.
6. *Леонюк Л.И., Тимченко Т.И., Альшинская Л.И.* Высокотемпературная кристаллизация, композиция и морфология монокристаллов ангидридных боратов // *Труды 11 совещания ИМА.* Новосибирск, 1978. С. 310–316.
7. *Huber G.* Miniature neodimium lasers // *Current Topics in Material Science.* Vol. 4. Amsterdam: North-Holland, 1980. P. 1–45.
8. *Воронько Ю.К., Кудрявцев А.Б., Соболев А.А., Сорокин Е.В.* Высокотемпературная спектроскопия КРС — метод исследования фазовых превращений в лазерных кристаллах // *Спектроскопия оксидных кристаллов для квантовой электроники.* М.: Наука, 1998. С. 50–100 (Тр. ИОФАН. Т. 29).
9. *Воронько Ю.К., Зуфаров М.А., Осико В.В.* Фазовые превращения в твердых растворах на основе диоксида циркония. М.: Физ. ин-т им. П.Н. Лебедева АН СССР, 1983 (Препринт / ФИАН; № 64).
10. *Павлушкин Н.М.* Стекло [Справочник]. М.: Стройиздат, 1973. 488 с.
11. *Ульянов Д. К.* Спектры плазменного релятивистского СВЧ-генератора: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИОФ РАН, 2000. 120 с.

Научное издание

Труды Института общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук

Том 72

Плазменная электроника

Утверждено к печати

*Ученым советом Института общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук*

Оригинал-макет выполнен
в лаборатории компьютерной обработки информации ИОФ РАН
Зав. лабораторией канд. физ.-мат. наук *Т.Б. Воляк*

Художественный редактор *В.Ю. Яковлев*

Подписано к печати 20.07.2016
 Формат 70×100¹/₁₆. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
 Усл. печ. л. 13,0. Усл. кр.-отг. 13,3. Уч.-изд. л. 12,0.
 Тип. зак.

ФГУП Издательство «Наука»
 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90

E-mail: secret@naukaran.com
 Internet: www.naukaran.com

Отпечатано в полном соответствии с качеством представленного
 оригинал-макета в ФГУП Издательство «Наука» (Типография «Наука»)
 121009 Москва, Шубинский пер., 6.

Для заметок

Для заметок

Для заметок