

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Институт прикладной физики

2001
10451

ФИЗИКА МИКРОВОЛН

*Сборник отчетов
по научным проектам МНТП России
"Физика микроволн"*

Нижний Новгород • 2001

Г2001
10451

Издано по решению научного совета МНТП "Физика микроволн"
при Министерстве науки и технологий Российской Федерации
и редакционно-издательского совета Института прикладной физики РАН

УДК 537.86.029; 612.3.029

**Физика микроволн: Сборник отчетов по научным проектам МНТП
России "Физика микроволн" за 2000 г. / Отв. ред. Е. В. Суворов. –
Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2001. – 196 с.**

В сборник включены отчеты за 2000 год по 39 проектам, выполняемым по Межотраслевой научно-технической программе "Физика микроволн". Отчеты отражают результаты исследований по четырем основным направлениям физики микроволн: 1) Источники микроволнового излучения; 2) Распространение микроволновых излучений и мониторинг окружающей среды; 3) Микроволновая спектроскопия и метрология. Приемники микроволновых излучений; 4) Взаимодействие микроволнового излучения с веществом.

Исследуемые эффекты и физические закономерности, разработанные методы и устройства находят применение в радиоспектроскопии, связи, локации, радиовидении, дистанционном зондировании окружающей среды, новых технологиях, плазмохимии и других областях науки и техники.

Сборник представляет интерес для широкого круга радиофизиков и радиоинженеров.

11644-2001
Сверено
2002 г.
ГПНТБ СО РАН
Гос. науч.-тех.
библиотека

Ответственный редактор

Е. В. СУВОРОВ

Редколлегия

**В. Л. БРАТМАН, С. В. ГОЛУБЕВ, Н. Н. КРАЛИНА (отв. секретарь),
О. С. МОЧЕНЕВА, Л. И. ФЕДОСЕЕВ (зам. отв. редактора)**

ISBN 5-8048-0014-0

© Институт прикладной физики РАН, 2001 г.

не пр
КПТБ

Проект 1.3. Теоретическое и экспериментальное исследование мощных мазеров на свободных электронах с двумерной распределенной обратной связью

ИЯФ СО РАН, ИПФ РАН

*А. В. Аржанников, Н. С. Гинзбург, Н. Ю. Песков,
С. Л. Сеницкий*

В рамках проекта исследуется возможность создания МСЭ-генераторов миллиметрового диапазона с гигаваттным уровнем мощности на основе сильноточных микросекундных ленточных РЭП. При этом проблема получения когерентного излучения при большой ширине пучка должна решаться путем использования двумерной распределенной обратной связи (РОС).

В 2000 году были проведены теоретические исследования новых схем МСЭ с двумерной РОС, направленные на увеличение мощности и обеспечение стабильности одномодового одночастотного режима генерации. В частности, была исследована схема МСЭ с комбинированным резонатором, составленным из двумерного и одномерного брэгговских зеркал. В такой схеме «двумерное» зеркало, расположенное на катодном конце резонатора, обеспечивает синхронизацию излучения различных частей электронного потока. Проведенное численное моделирование показывает, что на выходном (коллекторном) конце резонатора для замыкания цепи обратной связи предпочтительным является использование традиционного «одномерного» зеркала, которое позволяет снизить омические потери в системе по сравнению с рассмотренными ранее схемами, состоящими из двух «двумерных» зеркал. Проведен расчет и конструирование комбинированного резонатора для экспериментов на ускорителе ЭЛМИ (ИЯФ РАН, Новосибирск), в котором омические потери ожидается снизить до 5%-уровня.

Для дальнейшего увеличения мощности СВЧ-излучения исследована возможность развития поперечного сечения пространства взаимодействия микроволновых генераторов во втором поперечном направлении. Показано, что пространственная когерентность излучения может быть достигнута путем использования двумерной РОС в активных средах, развитых по трем пространственным координатам и представляющих собой многослойную структуру. Практической реализацией такой схемы может служить многопучковый генератор, который состоит из нескольких планарных секций (каналов), запитываемых ленточными РЭП. В каждом канале установлена двумерная брэгговская решетка, а различные каналы связаны электродинамическими трактами. Поперечные потоки электромагнитной энергии, воз-

никающие в брэгговских решетках, приводят к синхронизации излучения как внутри каждого из каналов, так и к взаимной синхронизации каналов. Проведенное численное моделирование показало возможность получения устойчивого режима одночастотной генерации, когда количество рабочих каналов может достигать 10 и более. Таким образом, использование двумерной РОС в перспективе позволяет генерировать в миллиметровом диапазоне электромагнитные импульсы с уровнем мощности $\sim 10^{10}$ Вт.

В 2000 году проведена серия «холодных» электродинамических экспериментов, в которых исследованы спектральные свойства двумерных брэгговских резонаторов планарной и коаксиальной геометрии, обладающих различными профилями гофрировки поверхности. Эти эксперименты подтвердили высокие селективные свойства подобных резонаторов по продольному и поперечному индексам мод и показали, что спектр мод резонатора в значительной степени определяется профилем гофрировки. Результаты экспериментов находятся в хорошем соответствии с расчетами.

В ИЯФ СО РАН продолжено экспериментальное исследование мощного планарного 75 ГГц МСЭ-генератора с двумерной РОС, реализованного в рамках выполнения проекта на предыдущем этапе исследований. Запитка генератора осуществлялась ускорителем ЭЛМИ, формирующим ленточным РЭП с поперечным сечением 0,4×12 см, энергией 0,8–1,0 МэВ, погонным током 100–200 А/см и длительностью импульса до 5 мкс. Раскачка рабочих баунс-осцилляций пучка производилась в планарном ондуляторе с периодом 4 см и поперечным полем на оси до 1,5 кЭ. Для транспортировки пучки использовалось продольное магнитное поле, которое могло варьироваться в пределах от 3 до 15 кГс.

В новой серии экспериментов была проведена оптимизация геометрии резонатора. В частности, использовавшиеся в первоначальных экспериментах брэгговские зеркала с гофрировкой в виде прямоугольных канавок были заменены на зеркала с нарезкой в виде «шахматных ячеек». Согласно проведенному теоретическому анализу и результатам «холодных» электродинамических тестирований недостатком нарезки первого типа является появление дополнительных частотных полос, соответствующих «одномерному» брэгговскому отражению. В предшествующих экспериментах, в которых использовались брэгговские структуры с нарезкой в виде прямоугольных канавок, это приводило к появлению примеси «паразитного» излучения на частоте ~ 78 ГГц. В то же время, зеркала с «шахматной» нарезкой обладают существенно лучшими селективными свойствами: в «холодных» тестах отражение рабочей ТЕМ-волны резонатора, имевшее место в районе частоты 75 ГГц и осуществляемое через связь четырех парциальных волн того же ТЕМ-типа, наблюдалось практически без примеси «паразитных» одномерных брэгговских отражений.

В соответствии с результатами численного моделирования и «холодных» измерений в экспериментах на ускорителе ЭЛМИ при замене брэгговских структур излучение в районе частоты 78 ГГц, соответствующее работе генератора на «паразитных» цепях обратной связи, не наблюдалось. Измеренный спектр и структура выходного излучения соответствовали возбуждению рабочей ТЕМ-волны резонатора в расчетной полосе «двумерного» брэгговского отражения около 75 ГГц. Оптимальные значения полей и ширина зоны самовозбуждения генератора находились в хорошем совпадении с результатами моделирования. Согласно расчетам при укорочении длины пространства взаимодействия (регулярной части резонатора) до 30 см в экспериментах достигнуто увеличение КПД генератора до 10 % при выходной мощности излучения на уровне 100 МВт.

В то же время следует отметить, что в проведенной серии экспериментов гофрировка была выполнена несколько более глубокой по сравнению с расчетным значением. С этим может быть связано наблюдавшееся в эксперименте развитие ВЧ-пробоя в генераторе и укорочение СВЧ-импульсов, длительность которых в данной серии экспериментов составляла ~ 200 нс. Выяснение факторов, приводящих к укорочению импульсов излучения, является задачей следующего этапа исследований.

Литература

1. Agarin N. V., Arzhannikov A. V., Bobylev V. B., Ginzburg N. S., Ivanenko V. G., Kalinin P. V., Kuznetsov S. A., Peskov N. Yu., Sergeev A. S., Sinitzky S. L., Stepanov V. D. First operation of powerful FEL with two-dimensional distributed feedback // Nuclear Instr. and Methods in Phys. Research A. 2000. V. A445. P. 222-229.
2. Песков Н. Ю., Гинзбург Н. С., Денисов Г. Г., Сергеев А. С., Аржанников А. В., Калинин П. В., Синуцкий С. Л., Степанов В. Д., Петров П. В. Теоретическое и экспериментальное исследование пространственно-развитых планарных двумерных брэгговских резонаторов // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26, В. 8. С. 72-83.
3. Гинзбург Н. С., Песков Н. Ю., Сергеев А. С., Аржанников А. В., Синуцкий С. Л. К теории планарных ЛСЭ с комбинированными резонаторами, составленными из одномерного и двумерного брэгговских зеркал // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26, В. 16. С. 8-16.
4. Arzhannikov A. V., Agarin N. V., Bobylev V. B., Burdakov A. V., Burmasov V. S., Ginzburg N. S., Diankova E. V., Ivanenko V. G., Kalinin P. V., Kuznetsov S. A., Peskov N. Yu., Petrov P. V., Sergeev A. S., Sinitzky S. L., Stepanov V. D. Operation of High-power Planar FEM with Two-dimensional Bragg reflectors (Theoretical and Experimental Investigations) // Abstracts of Int. Conf. BEAMS-2000, Nagaoka, Japan, 2000, P.32.
5. Arzhannikov A. V., Kalinin P. V., Kuznetsov S. A., Sinitzky S. L., Stepanov V. D., Ginzburg N. S., Peskov N. Yu., Sergeev A. S., Diankova E. V., Petrov P. V. Selective properties of planar Bragg reflectors with various 2-D surface corrugation // Abstracts of Int. Conf. EUROEM-2000, Edinburgh, UK, 2000. P.124.
6. Agarin N. V., Arzhannikov A. V., Bobylev V. B., Ginzburg N. S., Diankova E. V., Ivanenko V. G., Kalinin P. V., Kuznetsov S. A., Peskov N. Yu., Petrov P. V., Sergeev A. S., Sinitzky S. L., Stepanov V. D. Progress in development of high-power planar FEL with two-

dimensional Bragg resonator and sheet electron beam // Abstracts of the 22nd Int. FEL Conf., Durham, USA, 2000, P.33.

7. Cross A. W., Ginzburg N. S., He W., Konoplev I. V., Peskov N. Yu., Phelps A. D. R., Robb G. R. M., Ronald K., Sergeev A. S., Whyte C. G. Potential for increasing the power of Free-Electron Maser using novel 2-D Bragg coaxial structures // Digest of 25-th Int. Conf. on IR and MM Waves, Beijing, China, 2000. P. 45-46.
8. Гинзбург Н. С., Песков Н. Ю., Сергеев А. С., Аржанников А. В., Синуцкий С. Л. Использование двумерной распределенной обратной связи для синхронизации многолучевой системы планарных МСЭ // Письма в ЖТФ, в печати.
9. Гинзбург Н. С., Песков Н. Ю., Сергеев А. С. Генерация пространственно-когерентного излучения в коаксиальном ЛСЭ с комбинированным резонатором, составленным из одномерного и двумерного брэгговских зеркал // ЖТФ, в печати.
10. Ginzburg N. S., Peskov N. Yu., Sergeev A. S., Arzhannikov A. V., Sinitzky S. L., Kalinin P. V., Phelps A. D. R., Cross A. W., Konoplev I. V. Progress in development of high-power FELs with two-dimensional Bragg resonators // Nuclear Instr. and Methods in Phys. Research A, accepted for publication.

Проект 1.5. Исследование и разработка магниконов сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн и их применение в ускорителях для фундаментальных исследований и промышленных приложений

ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН

*И. А. Запрягаев, Е. В. Козырев, Г. И. Кузнецов,
А. А. Никифоров, Г. Н. Острейко, Б. З. Персов,
Г. В. Сердобинцев, В. В. Тарнецкий, М. А. Тиунов*

Омега-П, Нью Хевен (Коннектикут, США)

О. А. Нежевенко, В. П. Яковлев

Более тридцати лет в ИЯФ СО РАН успешно ведутся работы по созданию нового класса мощных эффективных микроволновых источников энергии с модуляцией релятивистского пучка электронов путем круговой развертки. Первые приборы, использующие этот метод модуляции, получили название гироконов [1]. В институте были созданы импульсные гироконы на частотах 430, 180 и 3000 МГц. Дальнейшее развитие приборы с круговой разверткой получили с изобретением и созданием в 80-х годах магникона [2]. В качестве прототипов источников ВЧ-мощности ускорителей были созданы и успешно прошли испытания импульсные магниконы на частоту 915 МГц и 7 ГГц [3].

В рамках данного проекта круг наших исследований в 2000 г. был сосредоточен на:

- 1) разработке и оптимизации конструкции импульсного магникона мощностью до 80 МВт на частоте 2856 МГц с КПД более 50%;
- 2) развитию и отработке технологии изготовления и настройки цельнопаянной прогревной конструкции ВЧ-системы 34 ГГц импульсного магникона;
- 3) разработке концепции 1300 МГц магникона непрерывного действия с выходной мощностью 100 кВт и КПД более 50%.

1. Импульсный магникон 2856 МГц и 80 МВт

ВЧ-система создаваемого в ИЯФ СО РАН форинжектора ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-5 [4, 5] базируется на четырех клистронах 5045 диапазона 10 см (производства SLAC, США). Выбор этого клистрона определялся высокой импульсной мощностью – до 67 МВт, КПД до 47%, большим сроком жизни – до 40 тыс. часов – и отсутствием отечественных аналогов.

В качестве альтернативного усилителя СВЧ-мощности было решено разработать импульсный 2856 МГц магникон. Предварительные оценки показали, что магникон может обладать параметрами, не уступающими американскому клистрону. На основе имеющегося в ИЯФ опыта такой прибор был разработан [6].

Конструктивная схема прибора изображена на рис. 1. Магникон является усилителем-удвоителем частоты входного сигнала и состоит из диодной электронной пушки, соленоида, высокочастотной системы и коллектора. Электронный пучок, сформированный электронной пушкой, инжектируется в высокочастотную систему. Высокочастотная система содержит 5 цилиндрических модулирующих резонаторов и один выходной. Модуляция электронного пучка путем отклонения его от оси и круговой развертки осуществляется входным и четырьмя пассивными резонаторами, настроенными на частоту 1428 МГц. Так же, как и 7 ГГц [3], 2856 МГц магникон работает на второй гармонике входной частоты. Передача энергии пучка высокочастотным колебаниям происходит в выходном резонаторе, настроенном на частоту 2856 МГц. В модулирующих резонаторах возбуждаются вращающиеся по азимуту колебания TM_{110} , а в выходном резонаторе – TM_{210} . Все резонаторы помещены в продольное статическое магнитное поле сопровождения, создаваемое соленоидом. Подбором токов в катушках соленоида создаются необходимые для эффективной работы прибора величина и распределение магнитного поля.

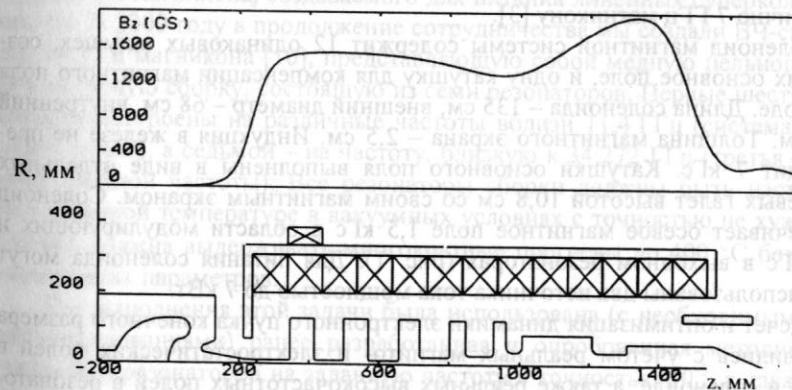


Рис. 1. Общий вид 2856 МГц магникона

При разработке источника электронов использовалась концепция формирования мощных электронных пучков с высокой плотностью тока, созданная в нашем институте [7]. Электронная пушка включает 120 мм сферический оксидный катод, изолятор, фокусирующий электрод и анод. Ток пушки при анодном напряжении 470 кВ составляет 312 А. Конструкция

пушки обеспечивает равномерную эмиссию с поверхности катода, причем максимальная плотность тока не превосходит 3 А/см^2 . Такая плотность тока позволяет рассчитывать на срок эксплуатации прибора, сравнимый с временем жизни клистрона 5045. Напряженность электрического поля максимальна на поверхности анода и не превышает 190 кВ/см . Напряженность же электрического поля на поверхности фокусирующего электрода менее 140 кВ/см . Геометрия пушки обеспечивает электростатическую компрессию 300:1 и диаметр электронного пучка на входе в соленоид не более 7 мм (95% тока заключены внутри диаметра $6,4 \text{ мм}$).

Отличительной особенностью работы ВЧ-системы данного магникона является то, что последние три пассивных резонатора увеличивают отклонение пучка на одинаковый угол ~ 17 градусов (сложение углов отклонения на отдельных резонаторах – [8]). Такой режим работы позволяет существенно снизить (приблизительно в три раза) максимальную напряженность электромагнитных полей в последнем модулирующем резонаторе и повысить устойчивость работы всего прибора. Ранее режим сложения углов, но только на двух отдельных резонаторах, был использован в конструкциях 11 ГГц [9] и 34 ГГц импульсных магнитонов [10].

Выходной резонатор снабжен двумя волноводными выводами высокочастотной мощности. Оптимальная величина нагруженной добротности выходного резонатора составляет 185. Компенсация продольной и азимутальной неоднородности ВЧ-полей в выходном резонаторе осуществляется аналогично 7 ГГц магникону [3].

Соленоид магнитной системы содержит 12 одинаковых катушек, создающих основное поле, и одну катушку для компенсации магнитного поля на катоде. Длина соленоида – 135 см , внешний диаметр – 68 см , внутренний – 39 см . Толщина магнитного экрана – $2,5 \text{ см}$. Индукция в железе не превосходит 7 кГс . Катушки основного поля выполнены в виде отдельных кольцевых галет высотой $10,8 \text{ см}$ со своим магнитным экраном. Соленоид обеспечивает осевое магнитное поле $1,5 \text{ кГс}$ в области модулирующих и $1,95 \text{ кГс}$ в выходном резонаторах (рис. 1). Для питания соленоида могут быть использованы два источника тока мощностью до 7 кВт .

Расчет и оптимизация динамики электронного пучка конечного размера проводились с учетом реальных магнито- и электростатических полей в пушке и соленоиде, а также реальных высокочастотных полей в резонаторах магникона. Для этого использовались специальные разработанные в институте программы [11, 12]. Основные расчетные параметры 2856 МГц магникона приведены ниже.

Рабочая частота	2856 МГц
Входная частота	1428 МГц
Выходная мощность	79,7 МВт

Входная мощность	170 Вт
Длительность импульса	5 мкс
Частота повторения	50 Гц
КПД	54,3 %
Усиление	56,7 дБ
Напряжение пучка	470 кВ
Ток пучка	312 А
Микроперванс электронной пушки	0,96
E_{max} в 5-м резонаторе	115 кВ/см
E_{max} в выходном резонаторе	137 кВ/см
$P_{\text{ср. в ст.}}$ в 5-м резонаторе	56 Вт
$P_{\text{ср. в ст.}}$ в выходном резонаторе	120 Вт

2. Обработка технологии изготовления и настройки цельнопаяной прогревной ВЧ-системы импульсного 34 ГГц магникона

Основной трудностью запуска любого микроволнового СВЧ-устройства является его тренировка и обезгаживание рабочих объемов. Наиболее просто это достигается в прогревных цельнопаяных структурах. В 1998–1999 гг. в рамках научного сотрудничества ИЯФ СО РАН с фирмой OMEGA-P, Inc. (США) нами была изготовлена, настроена и испытана ВЧ-система для $11,424 \text{ ГГц}$ магникона, создаваемого для питания линейных суперколлайдеров [9]. В 2000 году в продолжение сотрудничества мы создали ВЧ-систему для 34 ГГц магникона [10], представляющую собой медную цельнопаяную резонаторную сборку, состоящую из семи резонаторов. Первые шесть резонаторов настроены на различные частоты вблизи $11,4 \text{ ГГц}$ (система модуляции пучка), а седьмой – на частоту, близкую к $34,272 \text{ ГГц}$ (третья гармоника входной частоты). Все резонаторы сборки должны быть настроены при заданной температуре в вакуумных условиях с точностью не хуже 10^{-4} . Сборка должна выдерживать многократные прогревы до $400 \text{ }^\circ\text{C}$ без изменения своих параметров.

Для выполнения этой задачи была использована (с необходимыми усовершенствованиями) ранее разработанная и опробованная методика для настройки резонаторов на заданную частоту с точностью 10^{-5} , а также создан специальный автоматизированный стенд для измерения собственных частот с точностью 10^{-6} . В состав измерительного стенда входят управляемый от компьютера низкочастотный синтезатор (со стабильностью 10^{-7}), набор созданных в институте умножителей частоты, высокочастотные измерительные элементы и устройства для автоматизированных измерений ВЧ-сигналов.

Методика измерений не требует создания дорогостоящих помещений для стабилизации температуры, давления и влажности или использования эталонных резонаторов (как это обычно делается при создании ускоряющих структур). Влияние температуры автоматически учитывается при измерении частот. Температурная поправка определяется по коэффициенту линейного расширения меди и измеренной температуре. Стабилизация влажности и давления внутри резонаторов достигается путем наполнения их "сухим" азотом, получаемым путем испарения жидкого азота под небольшим избыточным давлением. К настоящему времени резонаторная сборка изготовлена и испытана.

3. 1300 МГц магнотрон непрерывного действия

Использование источников синхротронного излучения для новых промышленных технологий получило широкое распространение в последние десятилетия. Эти источники базируются в основном на накопителях и резонансных микротронах, источниками ВЧ-питания для которых служат различные электронные приборы (как правило, клистроны), работающие в непрерывном режиме. 1300 МГц 100 кВт магнотрон непрерывного действия разрабатывается для этой цели. Основное преимущество магнотрона в сравнении с традиционно используемыми мощными клистронами состоит в том, что ВЧ-система не требует использования дорогостоящих ферритовых циркуляторов. А по своим основным параметрам магнотрон не уступает клистронам.

Магнотрон является усилителем и состоит из электронной пушки, резонаторной ВЧ-системы, соленоида и коллектора. ВЧ-система включает четыре модулирующих цилиндрических резонатора и выходной резонатор. Все резонаторы возбуждаются на колебаниях ТМ₁₁₀. Основные проектные параметры, габариты и вес прибора приведены ниже.

Рабочая частота	1300 МГц
Выходная мощность	0,1 МВт
Входная мощность	100 Вт
Электронный КПД	81 %
КПД	56 %
Усиление	40 дБ
Напряжение пучка	100 кВ
Ток пучка	1,7 А
E_{\max} в резонаторах ВЧ-системы	22 кВ/см
Максимальное удельное тепловыделение в стенках резонаторов	8 Вт/см ²

Максимальное магнитное поле соленоида	0,1 Т
Мощность питания соленоида	8 кВт
Высота прибора, включая пушку и коллектор	2,5 м
Внешний диаметр прибора	0,5 м
Полный вес прибора, включая соленоид	1,5 т

В настоящее время ведется численная оптимизация конструкции электронной пушки и ВЧ-системы прибора.

Литература

- 1 Budker G. I. et al. // Particle Accelerators. 1979. V. 10. P. 41–59.
- 2 Karliner M. M. et al. // NIM-A. 1988. V. A 269, № 3. P. 459–473.
- 3 Kozyrev E. V. et al. // Proc. of the International Workshop on Strong Microwaves in Plasmas. Nizhny Novgorod (2–9 August 1999). 2000. V. 2. P. 740–746.
- 4 Dikansky N. S. et al. // Proc. of 1994 Fourth European Part. Acc. Conf. London, June, 27. P. 482.
- 5 Авилов М. С. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Вып. 2, 3 (29, 30). Харьков, 1997. Т. 2. С. 36.
- 6 Запорожцев И. А. и др. // Труды 17-го совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино. 16–20 октября 2000 г. (в печати).
- 7 Baryshev Y. et al. // NIM-A, A-340. 1994. P. 241.
- 8 Nezhevenko O. A., Yakovlev V. P. // IEEE Trans. of Plasma Sci., 8-th Special Issue on High Power Microwave Generation (to be published).
- 9 Nezhevenko O. A. et al. // Proc. of the Particle Acc. Conference-PAC99 (to be published).
- 10 Nezhevenko O. A. et al. // Proc. of 7th European Particle Acc. Conference (to be published).
- 11 Fomel B. et al. // Proc. 13 Int. Conf. On High-Energy Accel. 1996. V. 1. P. 353.
- 12 Yakovlev V. et al. // Proc. of 1995 Part. Acc. Conf. and International Conference on High Energy Accelerators, Dallas, 1995. P. 1569.