

Электронные и ионные пучки

УДК 533.951.8

Использование большого тока электронного пучка в плазменном релятивистском СВЧ-генераторе

К. С. Беховская, И. Л. Богданкевич, П. С. Стрелков, В. П. Тараканов, Д. К. Ульянов

В релятивистской СВЧ-электронике существует проблема использования больших токов релятивистских электронных пучков (РЭП), т. е. удается использовать пучки с током меньшим, чем токи действующих сильноточных ускорителей. Показана возможность увеличения мощности генерируемого в плазменном релятивистском генераторе (ПРГ) СВЧ-излучения за счет увеличения абсолютного значения тока. При токах пучка, близких к значению предельного вакуумного тока, эффективность СВЧ-генерации уменьшается, поэтому рассмотрены схемы ПРГ с высоким значением предельного вакуумного тока, т. е. схемы с малым зазором между трубчатым РЭП и стенкой волновода. В работе рассмотрены результаты эксперимента и численного моделирования.

PACS: 52.35-g, 52.40-w

Ключевые слова: релятивистский, электронный, пучок, плазма, генератор, СВЧ-излучение, численное моделирование.

Введение

В релятивистской СВЧ-электронике существуют проблемы использования больших токов электронных пучков (РЭП) при заданной энергии электронов. Например, при энергии электронов 500 кэВ удастся эффективно использовать в СВЧ-генераторах ток до 5 кА (в плазменных релятивистских СВЧ-генераторах (ПРГ) до 2—3 кА), тогда как электронные ускорители позволяют получать токи пучка в десятки килоампер.

Согласно аналитической теории [1] плазменный релятивистский СВЧ-генератор (ПРГ) может эффективно работать при токах, не превышающих значение $0,4\text{--}0,5 I_0$, где I_0 — предельный вакуумный ток [2]. Это означает, что для создания сильноточных (при заданной энергии электронов) СВЧ-генераторов необходимо использовать системы с большим значением предельного вакуумного тока. Величина предельного тока увеличивается при уменьшении зазора между электронным

пучком и стенкой волновода. В плазменном СВЧ-генераторе используется гладкий цилиндрический волновод постоянного диаметра, что позволяет технически сделать зазор между РЭП и стенкой волновода малым, а значит получить большое значение предельного вакуумного тока.

Теоретические предсказания были подтверждены экспериментально. Был проведен физический эксперимент [2] при инжекции трубчатого РЭП внутри трубчатой плазмы. Значение предельного вакуумного тока составляло 3,3 кА. Величина тока в эксперименте была 2 и 3 кА ($0,6$ и $0,9 I_0$). Обнаружено, что при увеличении тока от 2 до 3 кА происходит снижение энергии (мощности) импульса СВЧ-излучения (рис. 1).

Цель данной работы — использовать другой резерв для повышения мощности, т. е. работать на больших токах реально существующих ускорителей, который не удастся использовать до сих пор ни в вакуумных СВЧ-генераторах, ни в плазменных. При этом мы ставим задачу повышения мощности СВЧ-излучения ПРГ за счет повышения тока РЭП, при сохранении уже достигнутого нами к.п.д., сохраняя при этом самое важное свойство ПРГ — возможность быстрой электронной перестройки частоты в несколько раз. Напомним, что вакуумных релятивистских СВЧ-генераторов с такой широкой электронной перестройкой частоты не существует.

Результат, представленный на рис. 1, получен на установке, схема которой показана на рис. 2.

Беховская Кристина Станиславовна, аспирантка.
Богданкевич Ирина Леонидовна, старший научный сотрудник.
Стрелков Павел Сергеевич, зав. лабораторией.
Тараканов Владимир Павлович, ведущий научный сотрудник.
Ульянов Денис Константинович, старший научный сотрудник.
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.
Тел. (499) 135-63-87. E-mail: bira@fpl.gpi.ru

Статья поступила в редакцию 15 апреля 2010 г.

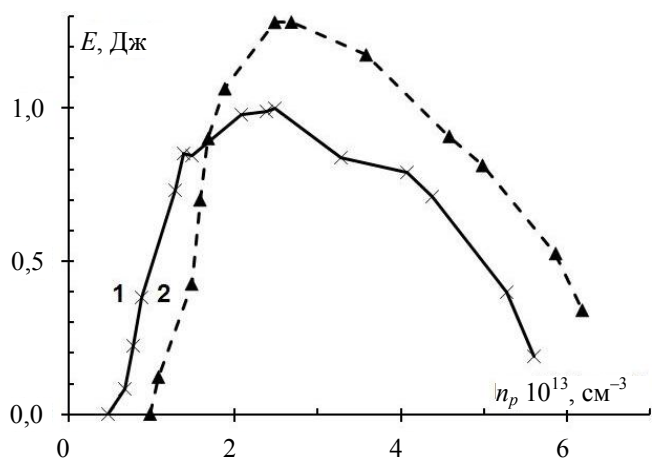


Рис. 1. Зависимость мощности ПРГ от плотности плазмы при различной величине токов РЭП:
 1 — 3 кА; 2 — 2 кА; $B = 1,2$ Тл; $r_b = 0,65$ см; $r_p = 1,0$ см;
 $R = 1,8$ см, энергия электронов 500 кэВ

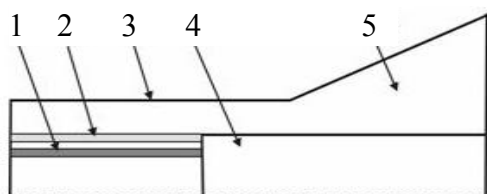


Рис. 2. Схема установки:
 1 — РЭП; 2 — плазма; 3 — волновод; 4 — коллектор;
 5 — излучающий коаксиальный рупор

РЭП и трубчатая плазма ограничены справа торцом центрального электрода коаксиального излучающего волновода. Электромагнитное излучение возникает в плазменном волноводе, образованном плазмой и металлическим волноводом 3, переходит в коаксиальный металлический волновод и затем излучается коаксиальным коническим рупором. СВЧ-мощность регистрируется на выходе из конического коаксиального рупора.

Схема установки, представленная на рис. 2, позволила впервые получить эффективную СВЧ-генерацию и перестройку частоты в 1982 г. [3] и использовалась в последующих экспериментах. В самых первых экспериментах (до 1982 г.) центральный коллектор 4 отсутствовал и трубчатая плазма и РЭП выводились на стенку волновода за счет ослабления магнитного поля, как это обычно делается в вакуумных черенковских СВЧ-приборах. Однако в такой геометрии эксперимента эффективную генерацию получить не удалось. Это объяснялось тем, что в плазме в области вывода на стенку магнитное поле уменьшается примерно в 4 раза и для каждой частоты излучаемого спектра найдется радиус, на котором образуется резонансный для циклотронного поглощения слой.

Таким образом, эти эксперименты показали, что плазма должна быть помещена в однородное магнитное поле. Вывод излучения должен осуще-

ствляться через коаксиальный металлический волновод — это единственный способ эффективно вывести СВЧ-излучение из плазменного волновода. В данной работе исследуется ПРГ, в котором отношение радиуса пучка к радиусу волновода больше, чем в схеме рис. 2. Ожидается, что это приведет к повышению мощности СВЧ-излучения при больших токах пучка.

Численное моделирование

Экспериментальным исследованиям предшествовало численное моделирование ПРГ. При проведении расчетов использовался код "КАРАТ" [4], аксиально-симметричная R - z модель. Считалось, что диэлектрическая проницаемость однородной по длине плазмы и ее поперечные размеры во времени не изменяются. При моделировании конический коаксиальный рупор заменялся идеальным поглотителем. Мощность излучения в расчете измерялась перед поглотителем. Предполагалось, что конический коаксиальный волновод в реальном эксперименте излучает без отражений, и замена его на идеальный поглотитель в расчетах правомерна.

Моделирование системы РЭП—плазма проводилось в несколько этапов. На первом этапе были получены зависимости мощности излучения от плотности плазмы для разных токов РЭП в стандартной схеме рис. 2. Были изменены значения радиусов волновода, пучка и плазмы, но сохранена принципиальная схема — пучок внутри плазмы, они распространяются в однородном магнитном поле и осаждаются на торец центрального электрода коаксиального металлического волновода.

Расчеты проводились при внешнем магнитном поле 1,2—2,0 Тл однородном на всей длине взаимодействия РЭП с плазмой. Радиус волновода $R = 3,0$ см, радиусы трубчатой плазмы $r_p = 1,9 - 2,15$ см, радиусы трубчатого РЭП $r_b = 1,6 - 1,7$ см, радиус коллектора $r_c = 2,15$ см. Длина взаимодействия во всех экспериментах была 20 см (в предварительных расчетах менялась от 10 до 30 см). Ток РЭП равен 2,5—6,0 кА, ускоряющее напряжение 400 кВ. Формы импульсов напряжения и тока РЭП в расчете совпадают с экспериментальными, длительность импульса напряжения по основанию 50 нс. При данной геометрии и энергии электронов 400 кэВ предельный вакуумный ток равен $I_0 = 4,6$ кА. Плотность плазмы менялась от $5 \cdot 10^{11}$ до $3 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Все параметры выбирались таким образом, чтобы их можно было достичь в физическом эксперименте на имеющемся ускорителе.

Оказалось, что во всех расчетах сохраняется приблизительно одинаковая зависимость частоты

излучения от плотности плазмы. Эта зависимость представлена на рис. 3. Хотя в расчетах реальным изменяемым параметром была плотность плазмы, мы в дальнейшем представляем расчетные зависимости мощности излучения от частоты излучения.

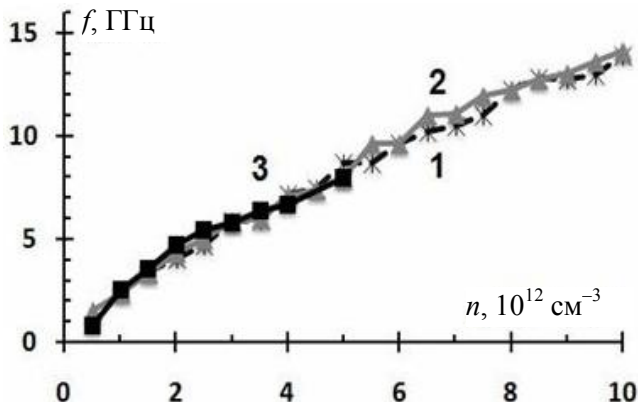


Рис. 3. Зависимость частоты СВЧ-излучения ПРГ от плотности плазмы:
1 — 2,5 кА; 2 — 3,8 кА; 3 — 6,0 кА.
Напряжение 400 кВ, магнитное поле 1,2 Тл

Для описанной выше постановки задачи в расчете получена зависимость мощности от частоты излучения, которая показана на рис. 4. Видно, что увеличение тока от 2,5 кА ($0,54 I_0$) до 3,8 кА ($0,82 I_0$) для частот выше 5 ГГц не приводит к увеличению мощности излучения в согласии с аналитической теорией. Однако при низких частотах мощность излучения с ростом тока возрастает вопреки предсказаниям аналитической теории. Совершенно противоречит теории увеличение мощности СВЧ-излучения при токе 6 кА ($1,3 I_0$).

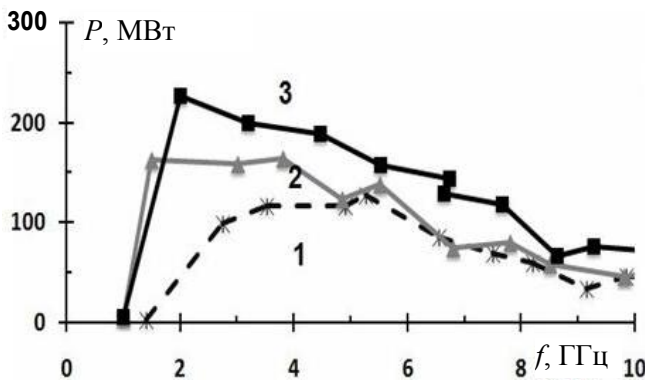


Рис. 4. Зависимость мощности СВЧ-излучения ПРГ от частоты для случая РЭП внутри плазмы:
1 — 2,5 кА; 2 — 3,8 кА; 3 — 6,0 кА; $R = 3$ см;
 $r_p = 1,9 - 2,15$ см; $r_b = 1,6 - 1,7$ см; $r_c = 2,15$ см.
Напряжение 400 кВ, магнитное поле 1,2 Тл

В соответствии с соображениями, изложенными в начале статьи, было решено провести моделирование для увеличенного радиуса пучка. Если РЭП и плазма осаждаются на торце центрального электрода излучающего коаксиального волновода, то максимальный радиус РЭП должен быть равен

радиусу коллектора, а плазма должна находиться внутри пучка, т. е. осуществляется режим с инжекцией РЭП снаружи плазмы. Результат расчета представлен на рис. 5, геометрия эксперимента указана в подписи к рис. 5. В этих условиях значительно уменьшается отношение токов РЭП к предельному вакуумному току, а именно: 2,5 кА ($0,32 I_0$); 3,8 кА ($0,49 I_0$); 6 кА ($0,78 I_0$). Из сравнения рис. 4 и 5 следует, что инжекция РЭП снаружи плазмы приводит к уменьшению мощности излучения как для малого тока, так и для большого.

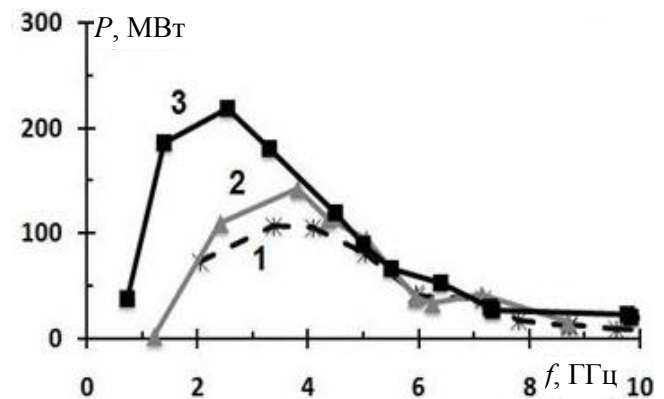


Рис. 5. Зависимость мощности СВЧ-излучения ПРГ от частоты для случая РЭП снаружи плазмы:
1 — 2,5 кА; 2 — 3,8 кА; 3 — 6,0 кА; $R = 3$ см;
 $r_p = 1,5 - 1,75$ см; $r_b = 2,05 - 2,15$ см; $r_c = 2,15$ см.
Напряжение 400 кВ, магнитное поле 1,2 Тл

Как показано в работе [5], незначительное уменьшение диаметра плазмы по сравнению с диаметром коллектора приводит к значительному увеличению отражения электромагнитной волны от перехода плазменный волновод — коаксиальный металлический волновод, что уменьшает эффективность мощных СВЧ-генераторов. Кроме того, продольная компонента напряженности электрического поля в медленной плазменной волне максимальна внутри плазмы и уменьшается при удалении от слоя плазмы к оси волновода слабее, чем при удалении к стенке волновода. В результате при инжекции РЭП снаружи плазмы уменьшается связь между полем волны и электронами РЭП. Этот эффект особенно проявляется на высоких частотах. Этим, по-видимому, объясняется резкое уменьшение мощности на высоких частотах при инжекции РЭП снаружи плазмы (см. рис. 5). Таким образом, в схеме с ограничением пучка по длине торцом центрального электрода излучающего коаксиального волновода увеличение радиуса РЭП не привело к повышению эффективности генерации СВЧ-излучения.

Анализ представленных выше результатов привел к постановке нового эксперимента. Для того чтобы уменьшить коэффициент отражения от пе-

перехода плазма — коаксиальный волновод и сохранить большой радиус РЭП была предложена другая геометрия эксперимента с осаждением РЭП на стенку волновода. Данная геометрия полностью совпадает с описанной выше, за исключением уменьшенного радиуса коллектора, который теперь почти совпадает с внешним радиусом плазмы (рис. 6). Теперь РЭП, имея радиус, превышающий радиус коллектора, пролетает мимо торца коллектора и затем в ослабленном магнитном поле попадает на стенку волновода. Результаты расчета для схемы рис. 6 представлены на рис. 7. Из сравнения кривых на рис. 5 и 7 следует, что осаждение пучка на стенку волновода приводит к увеличению мощности СВЧ-излучения. Наконец, из сравнения зависимостей мощности СВЧ-излучения от частоты для трех различных вариантов ПРГ (рис 8) следует перспективность ПРГ с выводом РЭП на стенку волновода для генерации низких частот при больших токах.

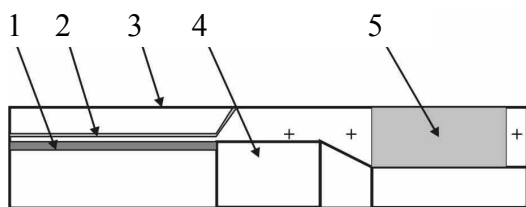


Рис. 6. Схема численного эксперимента:

1 — плазма; 2 — РЭП; 3 — волновод; 4 — коллектор; 5 — поглотитель; + — места проведения измерений параметров генератора

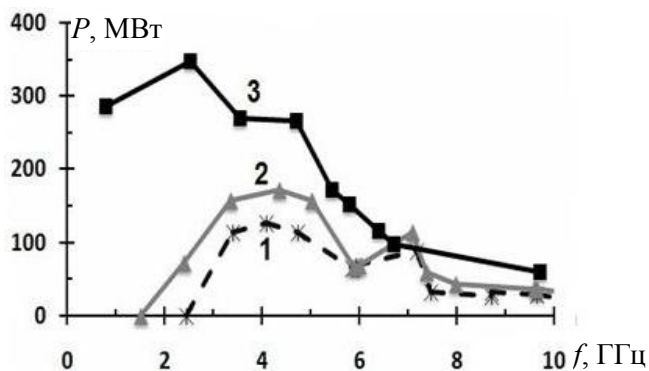


Рис. 7. Зависимость мощности СВЧ-излучения ПРГ от частоты для случая РЭП снаружи плазмы и его осаждения на стенку:

1 — 2,5 кА; 2 — 3,8 кА; 3 — 6,0 кА; $R = 3$ см; $r_p = 1,5 - 1,75$ см; $r_b = 2,05 - 2,15$ см; $r_c = 1,95$ см. Напряжение 400 кВ, магнитное поле 1,2 Тл

Обратим внимание на то, что мощность СВЧ-излучения всегда уменьшается в области высоких частот. Как было установлено в работе [6], мощность ПРГ всегда уменьшается на частотах, при которых выполняется резонанс между встречной плазменной волной и быстрой циклотронной волной электронного пучка (нормальный эффект Доплера). Все предыдущие расчеты были проведены

при магнитном поле 1,2 Тл. Для энергии электронов 400 кэВ и данного магнитного поля резонансная частота равна 9,4 ГГц. Поэтому были проведены расчеты при значении магнитного поля 2 Тл, для которого резонансная частота равна 15,6 ГГц. Это приводит к повышению мощности при высоких частотах во всех рассмотренных выше вариантах ПРГ. Для иллюстрации этого эффекта приведем зависимости мощности СВЧ-излучения от частоты для двух значений магнитного поля при выводе РЭП на стенку (рис. 9). Видно, что увеличение магнитного поля приводит к увеличению мощности СВЧ-излучения на частотах выше 6 ГГц.

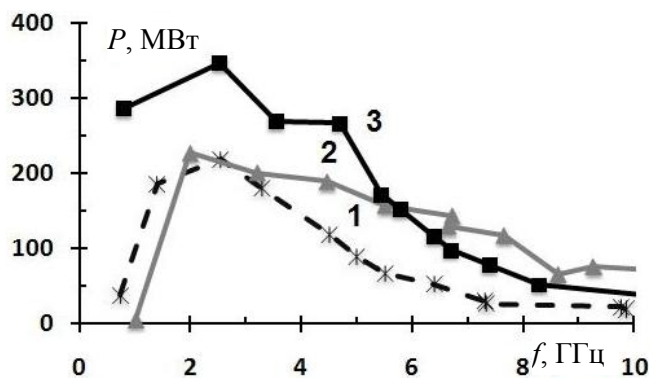


Рис. 8. Зависимость мощности излучения от частоты для различных вариантов ПРГ:

1 — РЭП снаружи плазмы и осаждается на коллектор; 2 — РЭП внутри плазмы; 3 — РЭП снаружи плазмы и осаждается на стенку волновода. Энергия электронов 400 кэВ, ток 6 кА, магнитная индукция 1,2 Тл

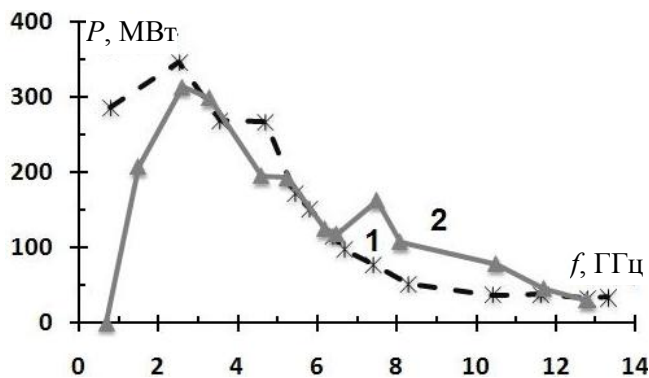


Рис. 9. Зависимость мощности излучения от частоты для двух значений магнитного поля:

1 — 1,2 Тл; 2 — 2 Тл. РЭП снаружи плазмы с выводом на стенку волновода. Энергия электронов 400 кэВ; ток 6 кА

Результаты моделирования использовались при создании экспериментальной установки. Все основные параметры экспериментальной установки были близки к численному эксперименту для схемы рис. 6. Как уже говорилось, схема реального эксперимента отличалась от модели только тем, что в ней отсутствовал поглотитель 5 на рис. 6, а коаксиальный металлический волновод переходил в конический коаксиальный рупор.

Эксперимент

Была создана новая установка, в которой РЭП выводится на стенку волновода, а плазма по длине ограничена торцом коллектора. Плазма, взаимодействующая с релятивистским электронным потоком, создавалась источником при прохождении специального электронного пучка с термокатада (напряжение 600 В, ток до 100 А) в остаточном газе (ксенон) с давлением не выше 10^{-3} Торр [7]. Эксперимент проводился при величине магнитного поля 1,2 Тл. Значения тока РЭП менялись от 2,5 до 5 кА при ускоряющем напряжении 400 кВ. Длина взаимодействия 19 см, радиус волновода 3,05 см. Поперечные размеры РЭП и плазмы и коллектора такие же, как и при численном моделировании, а именно: $r_p = 1,5—1,75$ см, $r_b = 2,05—2,15$ см, $r_c = 1,95$ см.

Получена зависимость энергии СВЧ-импульса от плотности плазмы (в относительных единицах). Максимальный уровень энергии импульса 0,8 Дж был получен при токе РЭП 3,8 кА, что соответствует величине СВЧ-мощности 40 МВт. Увеличение тока от 3,8 до 5 кА приводит к уменьшению мощности излучения. Такой же эффект уменьшения мощности с ростом тока наблюдался и при инжекции РЭП внутри плазмы (см. рис. 1). Подчеркнем, что в расчетах этого не наблюдалось.

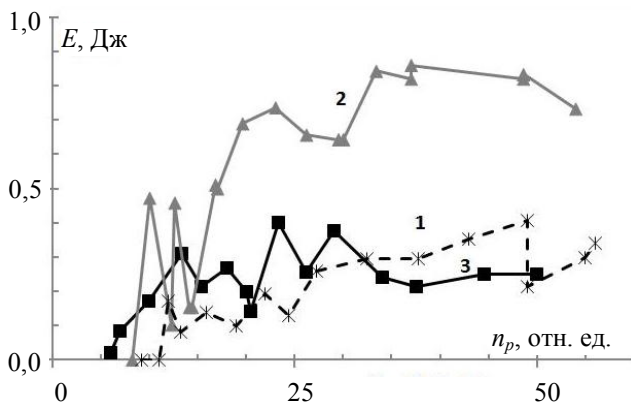


Рис. 10. Экспериментальная зависимость энергии импульса от плотности плазмы для различных значений токов РЭП:

энергия электронов 400 кВ; $L = 19$ см; $R = 3,05$ см;
 $r_p = 1,65$ см; $r_b = 2,1$ см; $B = 1,2$ Тл

Были проведены измерения спектра генератора. Измерения спектров проводились методом запердельных волноводов. Излучение, прошедшее через запердельные волноводы, регистрировалось либо калориметром, либо СВЧ-детектором. Измерения калориметром [8] позволяют снимать спектры с разрешением 3—4 ГГц. К сожалению, не удалось зарегистрировать перестройку частоты в широком диапазоне частот. Поэтому использовался более точный метод оценки частоты генерации с помо-

щью СВЧ-детектора и запердельных волноводов с разрешением 1 ГГц в диапазоне частот от 4 до 9 ГГц. В результате было установлено, что перестройка частоты составляет 2 ГГц с нижней границей менее 7 ГГц и верхней менее 9 ГГц. Генерации в области частот от 2 до 6 ГГц, где в расчетах зафиксировано максимальное значение мощности излучения, обнаружено не было. Напомним, что при инжекции РЭП внутри плазмы изменение плотности плазмы приводило к изменению мощности излучения (см. рис. 1) и перестройки частоты от 4 до 28 ГГц [9].

Заключение

Из расчета следует, что в схеме эксперимента, в которой РЭП и плазма ограничены по длине торцом коллектора, инжекция РЭП снаружи плазмы не эффективна.

Расчет показывает, что при выводе электронного пучка на стенку волновода и при энергии электронов 400 кВ плазменный СВЧ-генератор может иметь уровень мощности 200—300 МВт и обеспечивать перестройку частоты в 2 раза или более.

Результаты, полученные в эксперименте и в расчете, сильно расходятся. В эксперименте не удалось зарегистрировать излучения на частотах ниже 6 ГГц, где расчет предсказывает наиболее эффективную СВЧ-генерацию (200—300 МВт в диапазоне частот от 2 до 6 ГГц). Причина этого расхождения не установлена. Одна из возможных причин заключается в том, что в расчете предполагалась неизменность свойств плазмы в процессе взаимодействия РЭП с плазмой. Возможно, это неверно в условиях, при которых отношение плотности плазмы к плотности электронного пучка невелико. В дальнейшем предполагается повторить эти расчеты, используя метод крупных частиц для моделирования плазмы. Отметим, что для высоких значений плотности плазмы (большое отношение плотности плазмы к плотности РЭП), когда излучается частота 7—8 ГГц уровень мощности СВЧ-излучения в эксперименте и в расчете совпадает.

Методом численного моделирования показано, что верхняя граница полосы частотной перестройки плазменного СВЧ-генератора возрастает с ростом внешнего магнитного поля. Это объясняется тем, что верхняя граница полосы частотной перестройки плазменного СВЧ-генератора ограничена частотой циклотронного подавления электронным пучком встречной плазменной волны, которая растет с ростом внешнего магнитного поля.

Моделирование плазмы проводилось в приближении неизменности ее параметров во време-

ни. Были также предприняты попытки расчета с моделированием плазмы частицами (PIC-моделирование). К сожалению, пока не удалось получить надежные результаты во всем диапазоне параметров. Эта задача сама по себе представляет интерес. В подобных системах PIC-модели для плазмы использовались мало [10, 11]. Эти исследования будут продолжены.

Работа проводилась в рамках проекта РФФИ грант №08-08-00451.

Л и т е р а т у р а

1. Красильников М. А., Кузелев М. В., Рухадзе А. А. // ЖЭТФ. 1995. Т.108. № 2(8). С. 521.

2. Ульянов Д. К. Спектры плазменного релятивистского СВЧ-генератора: Дис. ... на соис. канд. физ.-мат. наук. М., 2000.

3. Кузелев М. В., Мухаметзянов Ф. Х., Рабинович М. С. и др. // ЖЭТФ. 1982. Т. 83. № 4 (10). С.1358.

4. Tarakanov V. P. User's Manual for Code KARAT // Springfield, VA: Berkley Research Associates, Inc. 1992.

5. Карташов И. Н., Красильников М. А., Кузелев М. В. // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. № 12. С. 1502.

6. Стрелков П. С., Пономарев А. В., Богданкевич И. Л. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 4. С. 366.

7. Лоза О. Т., Пономарев А. В., Стрелков П. С. и др. // Там же. 1997. Т. 23. № 3. С. 222

8. Шкварунец А. Г. // Приборы и техника эксперимента. 1996. № 4. С. 72.

9. Стрелков П. С., Ульянов Д. К. // Физика плазмы. 2000. № 4. С.329.

10. Bogdankevich I. L., Rukhadze A. A., Strelkov P. S., Tarakanov V. P. // Вопросы атомной науки и техники (Украина). Сер. "Физика плазмы". 2003. № 1. С. 102.

11. Богданкевич И. Л., Лоза О. Т., Павлов Д. А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2010 (в печати).

Harnessing high current for an electron beam in the plasma relativistic microwave oscillator

K. S. Bekhovskaya, I. L. Bogdankevich, P. S. Strelkov, V. P. Tarakanov, D. K. Ulaynov
Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences (GPI RAS),
38 Vavilova str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: bira@fpl.gpi.ru

There is a problem in relativistic microwave electronics, namely, how to utilize high currents of relativistic electron beams (REB) with definite electron energy. They manage to utilize electron beams with currents tens times less than the currents of electron accelerators in use at present. The goal of the present work was to demonstrate a possibility to raise the power of microwaves generated by a relativistic plasma maser (RPM) by increasing the electron current when approaching the REB to the waveguide wall. In the present work the regimes of an RPM operation with conventional geometry are compared with other possibilities of mutual positions of the beam and plasma. There are considered as experimental results as and numerical simulation dates.

PACS: 52.35-g, 52.40-w

Keywords: relativistic, electron beam, plasma, oscillator, microwave radiation, numerical simulation.

Bibliography — 11 references.

Received April 12, 2010