

09;12

## Плазменный релятивистский СВЧ-усилитель с диапазоном частот от 2 до 3 GHz

© И.Л. Богданкевич, И.Е. Иванов, О.Т. Лоза, П.С. Стрелков,  
Д.К. Ульянов, Е. Garate

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
E-mail: strelkov@fpl.gpi.ru

Поступило в Редакцию 31 октября 2006 г.

Экспериментально исследован плазменный релятивистский СВЧ-усилитель с перестройкой частоты от 2 до 3 GHz. Измерены спектр выходного излучения и разность фаз электрического поля входного и выходного излучений. Получены мощность выходного излучения 30–70 MW и усиление  $\approx 30$  dB.

PACS: 52.75.-d, 84.30.Lc

Плазменные релятивистские СВЧ-усилители отличаются от вакуумных релятивистских СВЧ-усилителей [1] широкой полосой частот усиления и большим диапазоном ее перестройки за счет изменения плотности плазмы. Так, например, в работе [2] описан плазменный релятивистский СВЧ-усилитель с шириной полосы частот 40% (от 9.1 до 13 GHz) при выходной мощности 40 MW.

Настоящая работа является продолжением наших исследований плазменных релятивистских СВЧ-усилителей. В ней впервые измерена разность фаз электрического поля входного и выходного излучений. Совпадение фаз входного и выходного сигналов позволяет создавать схемы, состоящие из нескольких усилителей, и увеличивать мощность выходного излучения пропорционально числу усилителей.

Плазменный релятивистский СВЧ-усилитель работал в режиме одиночных импульсов. Измерения разности фаз входного и выходного сигналов проводились по следующей методике. Выходное излучение принималось штыревой антенной с длиной штыря много меньшей, чем длина волны. Входной сигнал принимался штыревой антенной, расположенной внутри СВЧ-тракта, по которому мощность поступала в СВЧ-усилитель. По коаксиальным кабелям СВЧ-сигналы поступали

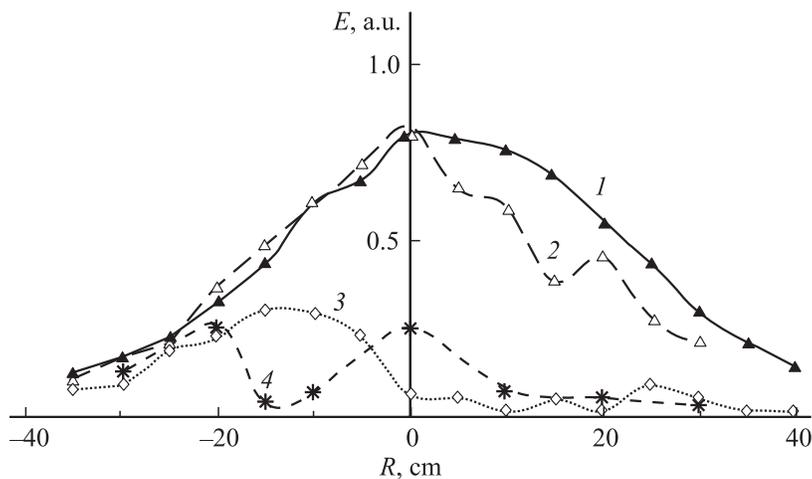
на широкополосный осциллограф. Обработка осциллограмм входного и выходного сигналов позволяла измерить спектры сигналов и определить поведение разности фаз двух сигналов в течение данного СВЧ-импульса.

В эксперименте использовался осциллограф TDS-7074 с полосой частот 4 GHz. Чтобы применить описанную выше методику, был создан плазменный СВЧ-усилитель с диапазоном частот примерно от 2 до 3 GHz. Схема этого усилителя незначительно отличается от схемы усилителя [2]. Так же как и в [2], в круглом металлическом волноводе заранее создается трубчатая плазма, затем в плазменный волновод инжектируется трубчатый электронный пучок с током 2 кА, энергией электронов 500 keV и длительностью импульса тока 200 ns. Плазма и электронный пучок находятся в продольном однородном магнитном поле с индукцией до 1 Т.

По сравнению с СВЧ-усилителем [2], поперечные и продольные размеры металлического волновода, трубчатой плазмы и трубчатого пучка были увеличены примерно в 4 раза, и было сделано только одно существенное изменение. В [2] волна из плазменного волновода переходила в вакуумный коаксиальный волновод и затем излучалась коаксиальным коническим рупором. В настоящей работе вакуумный коаксиальный волновод переходит в вакуумный широкополосный трансформатор моды, где ТЕМ волна преобразуется в моду  $H_{11}$  полого волновода и излучается коническим рупором. Мода  $H_{11}$  легко преобразуется в гауссов пучок, что удобно для различных применений.

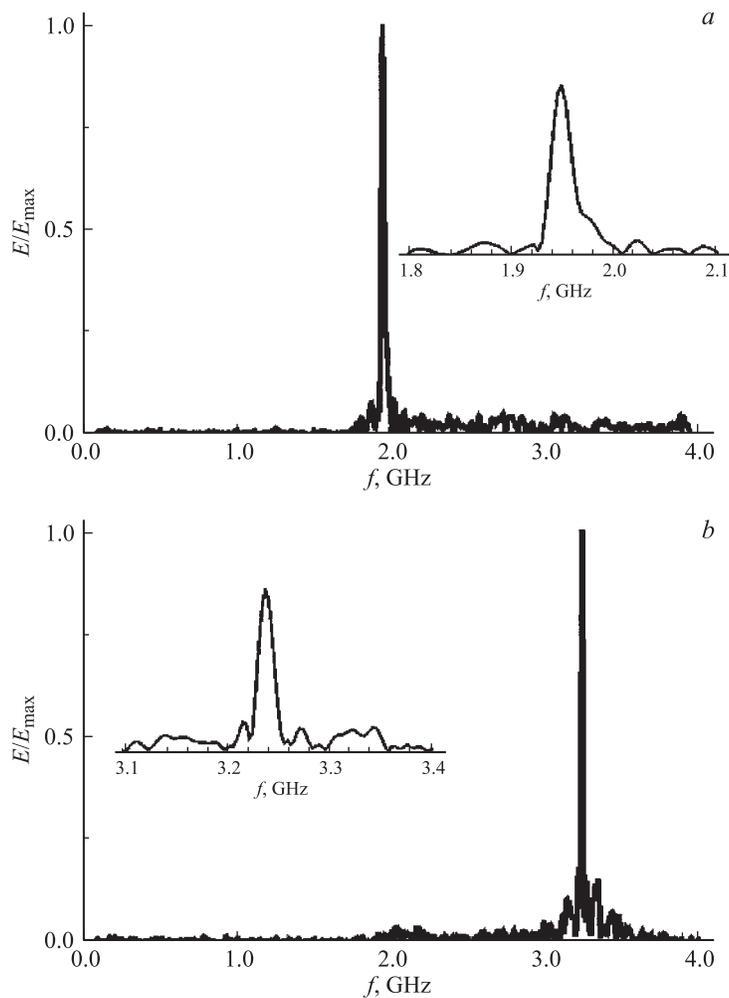
Работа преобразователя моды была проверена в холодных измерениях, когда входной СВЧ-сигнал шел до преобразователя по металлическому коаксиалу (вместо плазмы вставлялся металлический цилиндр с диаметром, равным диаметру плазмы), и в режиме усиления СВЧ-мощности в плазменном волноводе релятивистским электронным пучком. Значения горизонтального  $E_x$  и вертикального  $E_y$  компонентов электрического поля волны измерялись вдоль прямой, перпендикулярной оси и расположенной на расстоянии 60 см от апертуры рупора с диаметром 24 см. Результаты измерений представлены на рис. 1. Видно, что в обоих случаях распределения качественно соответствуют моде  $H_{11}$ . Результаты, показанные на рис. 1, получены при частоте сигнала 3.24 GHz, аналогичные результаты получены и при частоте 1.95 GHz.

При подаче на вход усилителя СВЧ-сигналов от магнетронов на частотах 1.95 GHz ( $\approx 20$  kW) и 3.24 GHz ( $\approx 40$  kW) на выходе усилителя



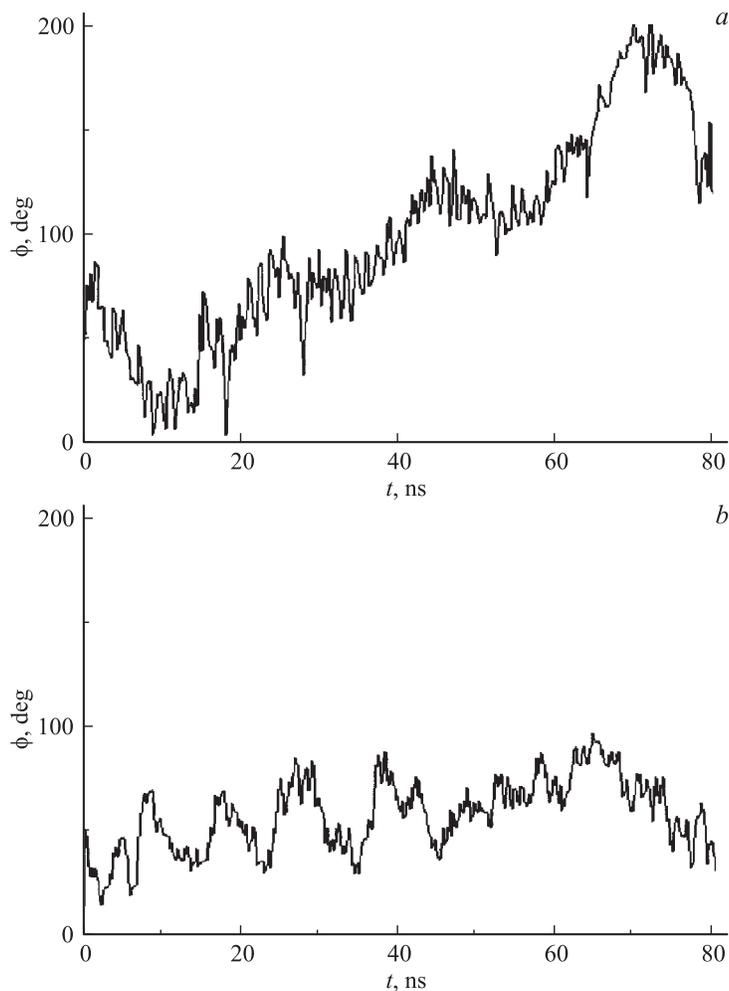
**Рис. 1.** Распределение компонент электрического поля  $E_x$  и  $E_y$  выходного излучения: 1 и 2 — компоненты  $E_y$ , 3 и 4 — компоненты  $E_x$ ; 1 и 3 — холодные измерения, 2 и 4 — измерения излучения плазменного усилителя.

регистрировались СВЧ-импульсы с длительностью не более 100 ns, что меньше, чем длительность импульса тока электронного пучка. Мощность выходного излучения определялась по результатам измерения энергии СВЧ-импульса калориметром и длительности СВЧ-импульса на осциллографе. Спектр электрического поля выходного излучения при частоте входного сигнала 1.95 GHz представлен на рис. 2, *a* (мощность выходного излучения 30 MW, длительность СВЧ-импульса 70 ns), а при частоте входного сигнала 3.24 GHz — на рис. 2, *b* (мощность выходного излучения 70 MW, длительность СВЧ-импульса 70 ns). Эффект усиления наблюдается при определенных значениях плотности плазмы, причем для высокой частоты оптимальное значение плотности плазмы в два раза выше, чем для низкой. Этот результат согласуется с результатами предыдущей работы [2]. Из рис. 2 следует, что ширина спектра равна 15–20 MHz и определяется длительностью СВЧ-импульса. При выключении входного сигнала наблюдается шумовой спектр в диапазоне частот от 2 до 3 GHz с уровнем мощности на 10 dB меньше, чем при наличии входных сигналов.



**Рис. 2.** Спектры плазменного СВЧ-усилителя для частот входного излучения 1.95 GHz (*a*) и 3.24 GHz (*b*).

Проведены измерения разности фаз электрического поля входного и выходного излучений, результаты показаны на рис. 3. При частоте входного сигнала 1.95 GHz (рис. 3, *a*) наблюдаются высокочастотные



**Рис. 3.** Зависимости разности фаз электрического поля входного и выходного сигналов от времени для частот входного излучения 1.95 GHz (a) и 3.24 GHz (b).

флуктуации с периодом 1.5 ns и амплитудой до 40 градусов и низкочастотные с периодом 12 ns и амплитудой до 10 градусов. Кроме того, наблюдается рост усредненного по периоду флуктуаций значения

разности фаз в течение длительности СВЧ-импульса. При частоте входного сигнала 3.24 GHz наблюдаются высокочастотные флуктуации с периодом 1 ns и амплитудой до 12 градусов и низкочастотные с периодом 10 ns и амплитудой до 30 градусов. Рост усредненного по периоду флуктуаций значения разности фаз в течение длительности СВЧ-импульса в этом случае почти отсутствует.

Периодические изменения разности фаз входного и выходного сигналов во времени могут объясняться нестабильностью скорости электронов в течение СВЧ-импульса (формой импульса напряжения на катоде ускорителя), возможными колебаниями плотности плазмы с ионными частотами, а также усилением собственных шумов электронного пучка, генерируемого взрывоэмиссионным катодом. Монотонный рост усредненного по периоду флуктуаций значения разности фаз при частоте 1.95 GHz может быть связан с незначительным ростом плотности плазмы в течение СВЧ-импульса. Природа наблюдаемой зависимости разности фаз входного и выходного сигналов от времени будет изучаться нами в последующих работах.

Здесь мы сообщаем первые результаты экспериментальных исследований плазменного СВЧ-усилителя, в котором использована самая совершенная диагностика параметров мощного одиночного СВЧ-импульса наносекундной длительности. Создан плазменный СВЧ-усилитель с диапазоном электронной перестройки частоты 45% (1.95–3.24 GHz). Излучается одна мода  $H_{11}$ , мощность излучения 30–70 MW, длительность СВЧ-импульса 70 ns, коэффициент усиления  $\approx 30$  dB, разность фаз электрического поля входного и выходного излучений на частоте 3.24 GHz не превышает 70 градусов.

Работа выполнена при поддержке АФГИР, грант #RU-P1-2578-МО-04, ГК ФАНИ № 02.452.11.7063 и РФФИ, грант 05-08-01501.

## Список литературы

- [1] *Abubakirov E.B., Denisenko A.N., Fuks M.I.* et al. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2002. V. 30. N 3. P. 1041–1052.
- [2] *Пономарев А.В., Стрелков П.С.* // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 1. С. 66–72.