

Подавление обратной связи в плазменном релятивистском усилителе шума с инверсной геометрией

А. В. Пономарев, А. Б. Булейко, Д. К. Ульянов

Впервые экспериментально получен режим усиления шумов в плазменном лазере с инверсной геометрией. Показано, что введение СВЧ-поглотителя переводит режим работы лазера из генераторного в усилительный. В обоих режимах показана перестройка частоты излучения при изменении плотности плазмы. Данная работа является этапом по реализации плазменного релятивистского усилителя шума с коротким импульсом РЭП.

Ключевые слова: плазменный СВЧ-генератор, плазменный лазер, широкополосный, релятивистский сильноточный электронный пучок.

Ссылка: Пономарев А. В., Булейко А. Б., Ульянов Д. К. // Прикладная физика. 2019. № 6. С. 24.

Reference: A. V. Ponomarev, A. B. Buleyko, and D. K. Ul'yanov, Prikl. Fiz., No. 6, 24 (2019).

Введение

Плазменные релятивистские СВЧ-генераторы и усилители (плазменные мазеры) основаны на взаимодействии трубчатой плазмы с трубчатым сильноточным релятивистским электронным пучком (РЭП) [1]. В большинстве плазменных мазеров электронный пучок распространяется внутри трубчатой плазмы, поскольку такая геометрия позволяет сравнительно легко сформировать плазму без угрозы попадания плазмы в диод, формирующий РЭП. Такая геометрия использовалась в плазменных СВЧ-генераторах (плазменных мазерах, плазменных релятивистских генераторах –

ПРГ). Самым первым из них был ПРГ в работе [2]. На ПРГ с таким расположением РЭП и плазмы были получены уникальные результаты по управлению частотой излучения СВЧ-импульсов с мощностью 50 МВт. Были продемонстрированы 7-кратная электронная перестройка частоты излучения как от импульса к импульсу [3], так и в течении одного импульса [4, 5] с изменением средней частоты спектра СВЧ-излучения на величину до 1,5 ГГц в течение 50 нс, узкий и широкий спектр излучения [6], генерация СВЧ-импульсов с частотой 50 Гц и с 4-кратной перестройкой частоты излучения [7]. Работы по усилению шума при расположении плазмы снаружи РЭП велись в исследованиях [8, 9].

Вследствие специфической структуры плазменной волны, вывод излучения плазменных мазеров осуществляется только по коаксиальному волноводу, центральный электрод которого является «продолжением» трубчатой плазмы приблизительно того же диаметра. Электронный пучок, распространяющийся внутри плазмы, осаждается на этот электрод (коллектор), который перегревается, выделяет газ и существенно нарушает процесс формирования плазмы с необходимыми для работы лазера параметрами. Для подавления такого процесса приходится использовать полый

Пономарев Анатолий Викторович¹, вед. инженер, к.ф.-м.н.

Булейко Алла Борисовна^{2,3}, м.н.с.

Ульянов Денис Константинович¹, зав. лаб., к.ф.-м.н.

¹ Институт общей физики имени А. М. Прохорова Российской академии наук.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

E-mail: Ulyanov@fpl.gpi.ru

² Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований.

Россия, 108840, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12.

³ Российский университет дружбы народов.

Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

Статья поступила в редакцию 1 октября 2019 г.

© Пономарев А. В., Булейко А. Б., Ульянов Д. К., 2019

коллектор сложной формы с дополнительным сильным магнитным полем и дополнительной высоковакуумной откачкой [7], что повышает сложность и энергоемкость устройства, снижая надежность и общий КПД. Именно поэтому большой интерес представляет изучение работы лазера в инверсной геометрии, в которой РЭП осаждается на легко охлаждаемую внешнюю стенку волновода. Целью данной работы как раз и является экспериментальное изучение режима усиления шумов в плазменном лазере с инверсной геометрией.

Схема эксперимента

Плазменный лазер был создан на основе сильноточного ускорителя электронов. Однократные импульсы ускоряющего напряжения куполообразной формы с амплитудой 270 кВ и длительностью по основанию 50 нс обеспечивали ток релятивистского электронного пучка (РЭП) до 1,2 кА.

Схема плазменного лазера показана на рис. 1. Пространство взаимодействия, образованное трубчатым РЭП 1, трубчатой плазмой 3, помещенных в полый цилиндрический волновод 2 является аксиально-симметричным. Трубчатый РЭП 1 со средним диаметром 44 мм и толщиной ~ 1 мм формировался взрывоэмиссионным катодом 4 и распространялся в цилиндрическом волноводе 2 вдоль его оси. Трубчатая плазма 3 со средним диаметром 37 мм и толщиной 2 мм создавалась путем ионизации газа при давлении 0,1 Па отдельным электронным пучком, который формировал термокатод 5, расположенный на внутреннем электроде коаксиального волновода 6. Создание плазмы и транспортировка РЭП осуществлялись в магнитном поле 1 Тл, создаваемом соленоидом 7. В области ослабления магнитного поля РЭП осаждался на внешнюю стенку коаксиального волновода 6. Плазма ограничивалась по длине заземленным электродом 8. СВЧ-волна усиливалась в волноводе 2 в результате взаимодействия медленной плазменной волны с РЭП [1], распространялась далее в волновод 6 и излучалась через рупор 9.

На ограничивающем плазму электроде 8 были установлены съемные керамические СВЧ-поглотители 10. Сам электрод 8 был электрически соединен со стенками волновода

таким образом, что структура РЭП искажалась незначительно. В ходе эксперимента определялись спектр напряженности электрического поля и мощность СВЧ-волны на выходе плазменного лазера. Спектральный состав волны определялся с помощью штыревой антенны длиной 12 мм, расположенной по оси системы на расстоянии 50 см за рупором, и осциллографа с полосой пропускания до 16 ГГц [10]. На рис. 2 приведен пример осциллограммы напряженности электрического поля СВЧ-волны (кривая 2), там же показана осциллограмма напряжения на катоде ускорителя (кривая 1).

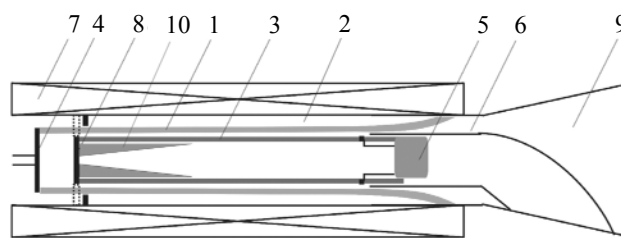


Рис. 1. Схема экспериментального плазменного лазера: 1 – релятивистский электронный пучок; 2 – цилиндрический волновод; 3 – трубчатая плазма; 4 – взрывоэмиссионный катод; 5 – узел нагрева термокатода; 6 – внутренний электрод коаксиального волновода; 7 – соленоид; 8 – подвижный электрод; 9 – рупор; 10 – СВЧ-поглотители.

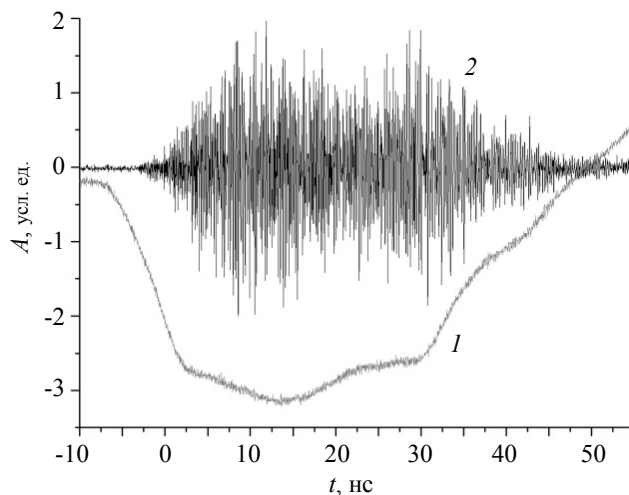


Рис. 2. Экспериментальные данные плазменного лазера: 1 – осциллограмма напряжения на катоде ускорителя; 2 – типичная осциллограмма напряженности электрического поля СВЧ-волны.

Данные о полной энергии СВЧ-импульса, полученные с помощью широкоапертурного широкополосного калориметра [11], и его длительности, определенной по осцилло-

грамме, позволили рассчитать среднюю за импульс мощность. В ходе экспериментов полная мощность СВЧ-излучения не превышала 10 МВт, т. е. электронный КПД не превышал 3 %.

Результаты эксперимента

На рис. 3. показаны спектры излучения плазменного лазера в отсутствие СВЧ-поглотителя для трех различных значений концентрации плазмы (соответственно 10, 30 и 60 отн. ед.) при длине взаимодействия 15 см. Видно, что спектры имеют ярко выраженный генераторный характер, когда одна-две линии

значительно преобладают по амплитуде над остальными. Также хорошо видна перестройка частоты генерации с 5 до 14 ГГц при повышении концентрации плазмы с 10 до 60 отн. ед.

Для подавления положительной обратной связи был использован широкополосный объемный СВЧ-поглотитель. Он помещался в систему вплотную к входному торцу лазера для уменьшения отражения СВЧ-волны от этого торца (см. рис. 1). На рис. 4 представлены усредненные по трем выстрелам спектры излучения плазменного лазера для тех же условий, что и на рис. 3, но в присутствии СВЧ-поглотителя.

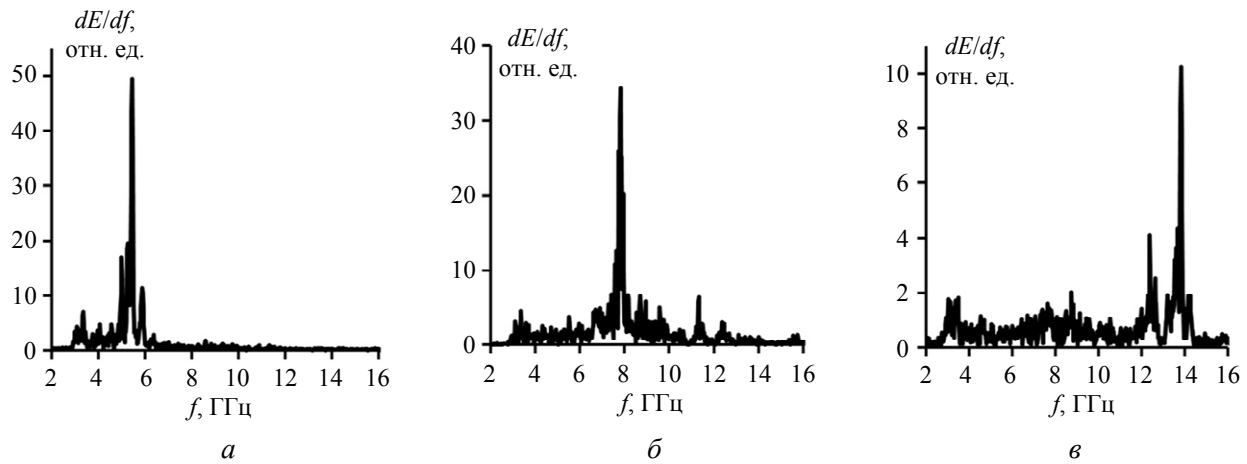


Рис. 3. Спектры излучения плазменного лазера в отсутствие СВЧ-поглотителя для трех различных концентраций плазмы: а – $n = 10$; б – $n = 30$; в – $n = 60$ отн. ед.

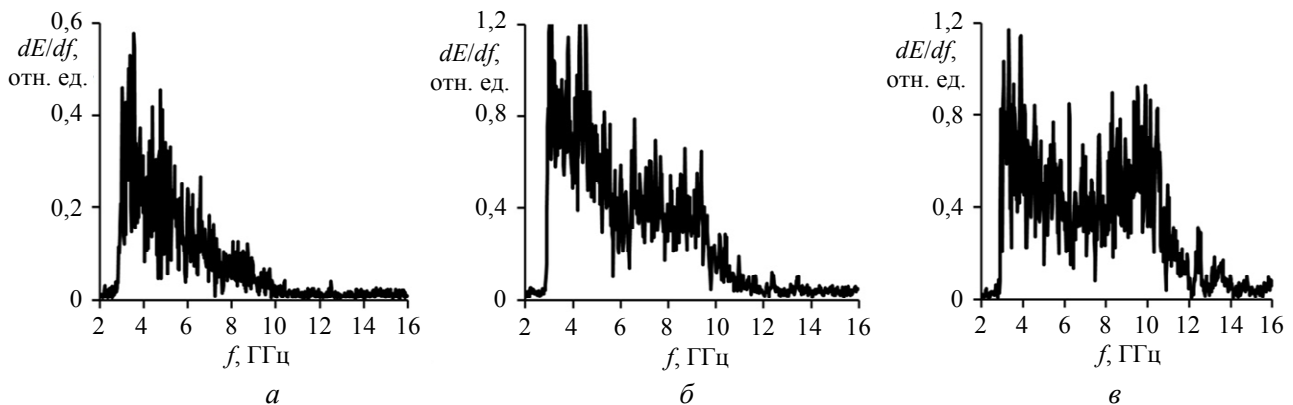


Рис. 4. Усредненные по трем выстрелам спектры излучения плазменного лазера в присутствии СВЧ-поглотителя для тех же условий, что и на рис. 3.

Во-первых, необходимо отметить резкое уменьшение амплитуды спектров, а именно, с $10 \div 50$ в режиме генерации до $0.5 \div 1$ в режиме усиления шума, то есть в $10 \div 100$ раз. Такое значительное уменьшение сигнала связано с тем, что СВЧ-поглотитель занимает большую

часть объема пространства взаимодействия (длина поглотителя 10 см, а длина взаимодействия 15 см).

Во-вторых, форма спектра кардинально меняется. Вместо отдельных узких линий, мы видим излучение в широком частотном диапа-

зоне: от 3 до 10 ГГц для концентрации плазмы 10 отн. ед. и от 3 до 12 ГГц для концентрации плазмы 30 и 60 отн. ед. Заметим, что излучение ниже 3 ГГц невозможно в силу конструкции выходного узла лазера. Наличие выходного излучения на всех частотах в широком диапазоне частот позволяет интерпретировать работу лазера как усилителя входных шумов.

На первый взгляд, кажется удивительным тот факт, что с ростом концентрации плазмы низкочастотная часть спектра (3÷5 ГГц) не

исчезает. Однако, это можно объяснить сильно неравномерной формой спектра входного шума, представленной на рис. 5.

Входной шум измерялся той же самой антенной, что и для излучения лазера, но концентрация плазмы устанавливалась равной нулю. В этом случае черенковское взаимодействие РЭП с электромагнитными волнами в волноводе невозможно, и входной шум, пройдя через систему, излучался выходным рупором и попадал на приемную антенну.

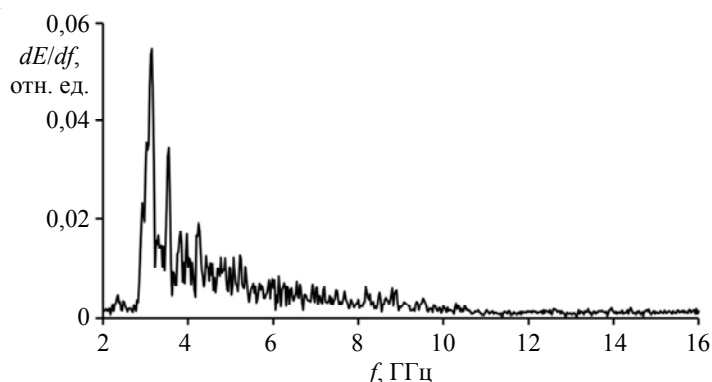


Рис. 5. Усредненный по трем импульсам спектр излучения входного шума плазменного лазера.

Видно, что входной шум имеет ярко выраженный максимум в районе 3÷4 ГГц и резко спадает с ростом частоты. Поэтому смещение максимума коэффициента усиления в область более высоких частот с ростом концентрации плазмы приводит к появлению высокочастотной (8÷10 ГГц) составляющей в спектрах на рис. 4, но практически не уменьшает низкочастотную составляющую (~ 4 ГГц).

Заключение

В данной работе впервые экспериментально получен режим усиления шумов в плазменном лазере с инверсной геометрией. Показано, что введение СВЧ-поглотителя переводит режим работы лазера из генераторного в усилительный. В обоих режимах показана перестройка частоты излучения при изменении концентрации плазмы. Если в режиме генерации перестройка частоты однозначно определяется изменением плотности плазмы, как это было показано в других подобных работах по плазменным генераторам с распространением РЭП внутри плазмы [3–6], то в режиме усиления шума изменение спектра излучения с ростом концентрации плазмы требует дальнейшего изучения. Необходимо бо-

лее подробно исследовать как спектр шума при разных значениях параметров установки, так и зависимость коэффициента усиления от плотности плазмы.

Авторы работы выражают благодарность С. В. Гарнову за поддержку работы и предоставление оборудования, без которого проведение эксперимента было бы невозможно. Авторы также благодарны П. С. Стрелкову за многочисленные полезные обсуждения.

Работа проведена при частичной поддержке программы РАН № 6 «Новые подходы к созданию и изучению экстремальных состояний вещества».

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузелев М. В., Лоза О. Т., Рухадзе А. А., Стрелков П. С., Шкварунец А. Г. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 8. С. 710.
2. Кузелев М. В., Мухаметзянов Ф. Х., Рабинович М. С., Рухадзе А. А., Стрелков П. С., Шкварунец А. Г. // ЖЭТФ. 1982. Т. 83. № 4. С. 1358.
3. Стрелков П. С., Ульянов Д. К. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 4. С. 329.

4. Ло́за О. Т., Улья́нов Д. К., Бара́нов Р. В. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 3. С. 98.
5. Улья́нов Д. К., Бара́нов Р. В., Ло́за О. Т., Ерны́лева С. Е., Богданкевич И. Л. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 10. С. 113.
6. Богданкевич И. Л., Ива́нов И. Е., Ло́за О. Т., Рухадзе А. А., Стрелков П. С., Тараканов В. П., Улья́нов Д. К. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 8. С. 748.
7. Ло́за О. Т., Улья́нов Д. К., Стрелков П. С., Ива́нов И. Е., Бара́нов Р. В. // Краткие сообщения по физике. ФИАН. 2011. Т. 38. № 4. С. 47.
8. Стрелков П. С., Ива́нов И. Е., Шумейко Д. В. // Физика плазмы. 2016. Т. 42 (7). С. 644.
9. Стрелков П. С., Тараканов В. П., Диас Михайлова Д. Е., Ива́нов И. Е., Шумейко Д. В. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 4. С. 335.
10. Ulyanov D. K., Andreev S. E., Alexeev I. S., Krymov R. R. // Physics of Wave Phenomena. 2017. Vol. 25. No. 1. P. 60.
11. Шкварунец А. Г. // ПТЭ. 1996. № 4. С. 72.

PACS: 52.59.Ye, 52.35.-g, 94.20.wf

Feedback suppression in the plasma relativistic microwave noise amplifier with inverse configuration

A. V. Ponomarev¹, A. B. Buleyko^{2,3}, and D. K. Ul'yanov¹

¹ Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov st., Moscow, 119991, Russia

² Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research
12 Pushkovykh st., Troitsk, Moscow Region, 108840, Russia

³ Peoples' Friendship University of Russia
6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russia

Received October 1, 2019

The noise amplification regime in a plasma maser with inverse geometry was obtained experimentally for the first time. It is shown that the introduction of a microwave absorber transfers the maser operating mode from the oscillator to the amplifier. In both modes, the tuning of the radiation frequency has been shown when the plasma density changes. This work is a step in the implementation of a plasma relativistic noise amplifier with a short pulse REB.

Keywords: high-power microwaves, HPM, plasma maser, high-current relativistic electron beam, REB, ultra wideband, UWB.

REFERENCES

1. M. V. Kuzelev, O. T. Loza, A. A. Rukhadze, P. S. Strelkov, and A. G. Shkvarunets, Plasma Physics Reports **27** (8), 669 (2001).
2. M. V. Kuzelev, F. Kh. Mukhametzyanov, M. S. Rabinovich, A. A. Rukhadze, P. S. Strelkov, and A. G. Shkvarunets, Sov. Phys. JETP **54**, 780 (1982).
3. P. S. Strelkov and D. K. Ul'yanov, Plasma Phys. Rep. **26**, 303 (2000).
4. O. T. Loza, D. K. Ul'yanov, and R. V. Baranov, Technical Physics **56** (3), 413 (2011).
5. D. K. Ul'yanov, R. V. Baranov, O. T. Loza, S. E. Ernyleva, and I. L. Bogdankevich, Technical Physics **58** (10), 1503 (2013).
6. I. L. Bogdankevich, I. E. Ivanov, O. T. Loza, A. A. Rukhadze, P. S. Strelkov, V. P. Tarakanov, and D. K. Ul'yanov, Plasma Physics Reports **28** (8), 690 (2002).
7. O. T. Loza, D. K. Ul'yanov, P. S. Strelkov, I. E. Ivanov, and R. V. Baranov, Bull. Lebedev Phys. Inst. **38** (4), 47 (2011).
8. P. S. Strelkov, I. E. Ivanov, and D. V. Shumeiko, Plasma Physics Reports **42** (7), 653 (2016).
9. P. S. Strelkov, V. P. Tarakanov, D. E. Dias Mikhailova, I. E. Ivanov, and D. V. Shumeiko, Plasma Physics Reports **45** (4), 345 (2019).
10. D. K. Ulyanov, S. E. Andreev, I. S. Alexeev, and R. R. Krymov, Physics of Wave Phenomena **25** (1), 60 (2017).
11. A. G. Shkvarunets, Prib. Tekh. Eksp., No. 4, 72 (1996).