

## Управление частотой излучения плазменного релятивистского СВЧ-генератора в течение импульса наносекундной длительности

© Д.К. Ульянов, Р.В. Баранов, О.Т. Лоза, С.Е. Ернылева, И.Л. Богданкевич

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
119991 Москва, Россия  
e-mail: loza@fpl.gpi.ru

(Поступило в Редакцию 9 октября 2012 г. В окончательной редакции 15 января 2013 г.)

Эксперименты и численное моделирование плазменного релятивистского СВЧ-генератора с мощностью 50 MW показали, что его частоту излучения можно менять до 15% в течение импульса с длительностью 60 ns, изменяя концентрацию плазмы. Плазма создана заранее ионизацией газа низкого давления. Увеличение степени ионизации газа в СВЧ-полях повышает частоту излучения, вытеснение электронов плазмы электростатическим полем сильноточного релятивистского электронного пучка снижает частоту излучения. Выбор давления газа и начальной степени ионизации плазмы определяет соотношение между этими процессами и позволяет управлять частотой излучения.

Работа плазменного релятивистского генератора (ПРГ) СВЧ-импульсов основана на черенковском взаимодействии потока релятивистских электронов с медленной волной пространственно-ограниченной плазмы. Источником релятивистского электронного пучка (РЭП) служит сильноточный ускоритель. Плазма создается перед каждым импульсом ускорителя ионизацией газа под давлением  $\sim 10^{-3}$  Торр специальным электронным пучком (600 eV, 30 A) [1] в течение нескольких десятков микросекунд.

В зависимости от концентрации созданной плазмы частота излучения ПРГ изменяется в широких пределах при сохранении всех остальных параметров. Например, в режиме одиночных СВЧ-импульсов ПРГ [2] изменял частоту излучения от 4 до 28 GHz от импульса к импульсу в любой заданной последовательности, а частота излучения импульсно-периодического ПРГ [3] менялась от 5 до 20 GHz. В этих и многих других работах частота СВЧ-излучения измерялась интегрально за время импульса, поэтому изменение частоты во время процесса излучения не регистрировалось.

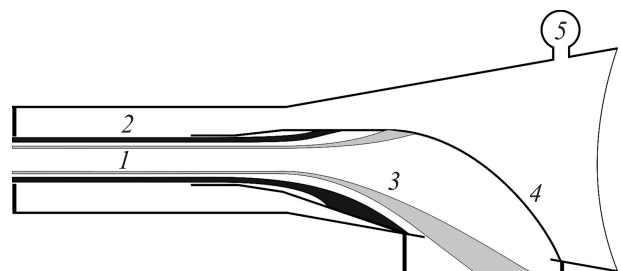
Динамика спектра излучения ПРГ во времени была исследована впервые в работе [4] на примере генератора с микросекундной длительностью импульса. Зарегистрировано изменение частоты и ширины спектра излучения, основной причиной этого явления названа сложная форма импульса напряжения на диоде ускорителя и сопутствующая зависимость энергии электронов от времени.

Принципиальная возможность менять частоту излучения ПРГ в течение СВЧ-импульса с длительностью 60 ns продемонстрирована в эксперименте [5]. В этой работе было показано увеличение частоты излучения вследствие ионизации остаточного газа в течение СВЧ-импульса с длительностью 60 ns. Измерения проводились с помощью СВЧ-детекторов излучения и фильтров верхних частот — запердельных волноводов. Одновременно использовались 3 СВЧ-детектора с фильтрами, имеющими разные частоты отсеки. Точность измерений

определялась разностью частот фильтров и в разных сериях менялась от  $\approx 1.5$  до  $\approx 3$  GHz, поэтому выводы носили характер оценки с указанной точностью.

Настоящая работа продолжает исследования [5]. Целью работы было изучение возможности управления частотой излучения ПРГ, т.е. нахождение параметров, изменение которых приводит к изменению частоты излучения в течение импульса.

Схема ПРГ (СВЧ-генератора на основе плазменной лампы бегущей волны) показана на рис. 1. За левой границей рисунка расположены источник РЭП — диод ускорителя, и источник плазмы — термокатод, создающий трубчатый электронный пучок для ионизации газа. Генерация плазменной СВЧ-волны осуществляется в области взаимодействия трубчатых РЭП 1 с плазмой 2. В этой области система аксиально-симметрична, однородное магнитное поле удерживает РЭП и плазму на расстоянии приблизительно 2–3 mm по радиусу друг от друга. Попутная электронам РЭП плазменная волна по достижении коллектора 3 сначала преобразуется в ТЕМ-волну коаксиального волновода, а затем в H11-моду полого волновода круглого сечения и в таком виде выходит из рупора 4. Электронный пучок проходит вовнутрь полого коллектора 3, десорбируя газ с его



**Рис. 1.** Схема плазменного релятивистского СВЧ-генератора: 1 — релятивистский электронный пучок, 2 — плазма, 3 — коллектор, 4 — рупор, 5 — датчик давления.

внутренних стенок и создавая коллекторную плазму. Эти процессы проходят в глубине коллекторного узла, который дополнительно откачивается вакуумным насосом, и далеко от торца коллектора, поэтому они практически не влияют на параметры плазмы в области, где осуществляется генерация СВЧ. Более подробно устройство ПРГ описано, например, в [6].

Диагностика параметров плазмы в присутствии РЭП невозможна вследствие наличия сильных СВЧ-полей, вызывающих пробой на любой неоднородной части поверхности волновода, например отверстия. Параметры плазмы могли быть оценены с помощью зонда Ленгмюра или по прохождению СВЧ-волны только в отсутствие РЭП, как это описано в [1]. По той же причине невозможно было измерить давление газа непосредственно в области взаимодействия РЭП с плазмой, поэтому датчики давления стояли в диоде РЭП и в выходном рупоре, т.е. в областях со сравнительно слабыми напряженностями СВЧ-полей.

Плазма с одной и той же концентрацией может быть получена при различных давлениях газа, т.е. при различной степени его ионизации электронным пучком. Концентрация плазмы определяет частоту СВЧ-излучения, а наличие и количество нейтральных атомов — возможность дальнейшей ионизации в СВЧ-поле. Ионизация газа низкого давления СВЧ-волной активно исследовалась в 1970–1980-х годах. Например, в работе [7] было экспериментально показано, что рост концентрации плазмы воздуха при давлении  $10^{-3}$  Torr в СВЧ-поле с частотой  $\approx 10$  GHz имеет максимальную скорость при напряженности поля  $\approx 70$  kV/cm. В этих условиях характерное время экспоненциального роста концентрации плазмы воздуха минимально и равно  $\approx 200$  ns. Приблизительно такие же значения давления газа и частоты поля характерны для ПРГ, а максимальная напряженность поля может превышать указанную величину на порядок. По этой причине при наличии достаточного количества нейтральных атомов в плазме можно ожидать заметного увеличения ее концентрации в СВЧ-поле.

Расчет изменения частоты излучения ПРГ, связанный с ионизацией газа в СВЧ-полях, проводился с помощью кода Карат [8] — полностью электромагнитного нестационарного вычислительного кода с использованием метода крупных частиц (particle-in-cell, PIC-метод). Использовалась так называемая 2.5-мерная RZ-версия кода Карат. Это название означает, что в расчете учитывалось наличие всех трех компонент полей, но распределения частиц и полей изменялись по радиусу  $R$  и длине  $Z$ , оставаясь однородными по азимуту. В расчете учитывались процессы ударной ионизации нейтральных молекул, рекомбинация не рассматривалась, уменьшение количества ионов и электронов определялось только их исчезновением на границах. Геометрия системы повторяла геометрию СВЧ-генератора [5].

На рис. 2 представлены результаты расчета динамики погонной концентрации частиц плазмы в ПРГ с

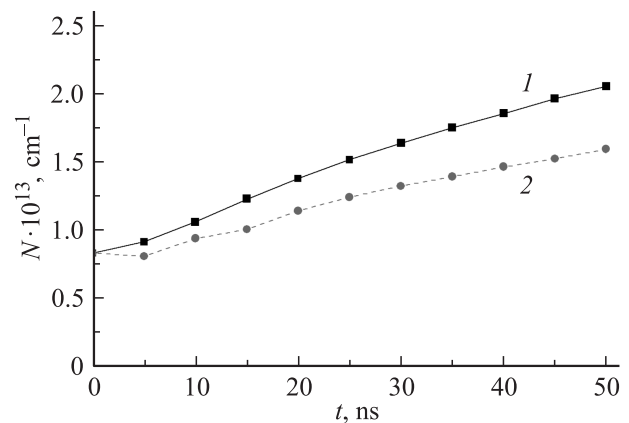
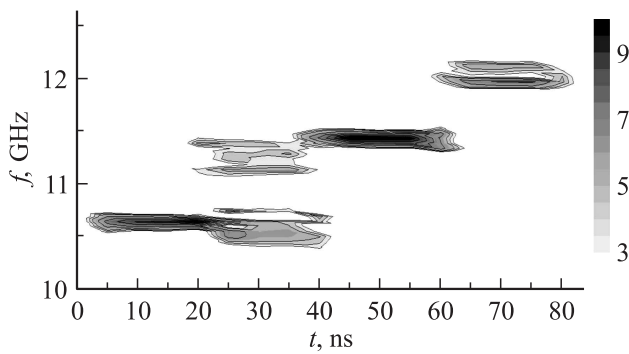


Рис. 2. Результаты расчета с помощью кода Карат погонной концентрации  $N$  ионов (1) и электронов (2) плазмы в течение импульса.

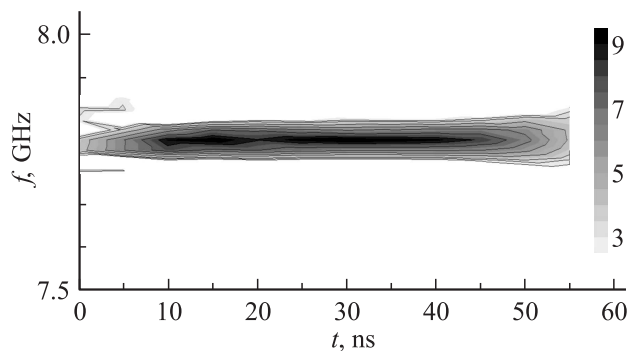
начальной концентрацией газа  $1.3 \cdot 10^{14}$  cm<sup>-3</sup> (давлением  $3.6 \cdot 10^{-3}$  Torr) и плазмы  $1.25 \cdot 10^{13}$  cm<sup>-3</sup>. В течение 50 ns число ионов удваивается, тогда как число электронов плазмы увеличивается только в 1.5 раза, причины этого будут обсуждаться ниже. В результате частота СВЧ-излучения меняется от 10.5 до 12 GHz.

Наряду с механизмом увеличения концентрации плазмы в течение импульса существует и механизм ее уменьшения, описанный в [9]. При инжекции отрицательно заряженного РЭП вовнутрь квазинейтральной плазменной трубки происходит выталкивание электронов из плазмы. Радиус трубчатой плазмы и ее толщина близки к значениям аналогичных параметров РЭП, поэтому при отсутствии ионизации через несколько десятков наносекунд после начала тока концентрация плазмы уменьшается приблизительно на величину концентрации РЭП. Поскольку концентрации РЭП  $10^{11}$  cm<sup>-3</sup> значительно меньше концентрации плазмы  $10^{12} - 10^{13}$  cm<sup>-3</sup>, уменьшение числа электронов плазмы благодаря этому механизму не очень существенно. Другой механизм уменьшения числа электронов в плазме связан с прохождением фронта РЭП и возникновением обратного тока в плазме. Для его поддержания на кромке коллектора возникает эмиссия электронов с током  $\sim 1$  kA, которые постепенно замещают электроны плазмы. В ПРГ с трубчатым коллектором эти электроны распространяются на расстояниях от РЭП больших, чем электроны плазмы, поэтому взаимодействие с ними электронов РЭП не столь эффективно, как с плазмой.

Результаты экспериментальных исследований ПРГ с различными начальными значениями концентраций газа и плазмы подтверждают возможность изменения частоты излучения в течение импульса. Численное значение давления, указанное для эксперимента, отличается от использовавшегося в расчетах, поскольку давление измерялось не внутри пространства плазменно-пучкового взаимодействия, а в диоде и выходном рупоре СВЧ-



**Рис. 3.** Экспериментальная зависимость спектра СВЧ-излучения от времени при давлении газа  $2 \cdot 10^{-3}$  Торр. Увеличение частоты излучения ПРГ вследствие ионизации газа в СВЧ-поле.



**Рис. 4.** Экспериментальная зависимость спектра СВЧ-излучения от времени при давлении газа  $1 \cdot 10^{-3}$  Торр. Генерация излучения с постоянной частотой при компенсации процессов увеличения и уменьшения концентрации плазмы.

генератора, т. е. ближе к вакуумным насосам. В экспериментах, результаты которых представлены ниже, частота излучения в начале импульсов выбрана различной, это сделано, чтобы подчеркнуть возможность перестройки от импульса к импульсу полосы частот излучения ПРГ. Результаты, аналогичные представленным здесь, были получены для любых частот в рабочем диапазоне ПРГ. Во всех проиллюстрированных режимах работы ПРГ мощность излучения, согласно калориметрическим измерениям, достигала 50 MW.

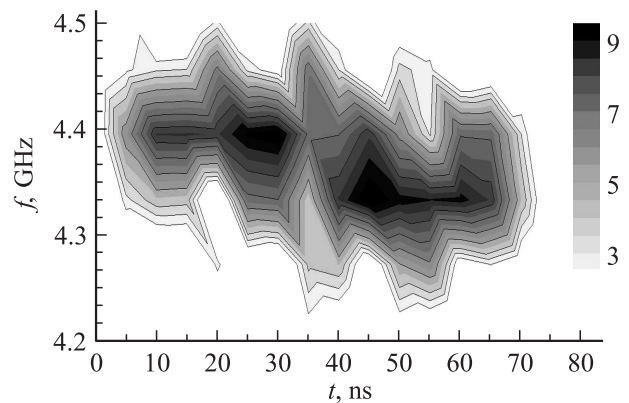
На рис. 3 показана динамика изменения спектра излучения ПРГ со слабо ионизированной плазмой в условиях, соответствующих описанному выше расчету. Сравнительно высокое давление газа обеспечивает достаточное количество нейтральных атомов для их последующей ионизации в СВЧ-полях. В течение импульса частота меняется на 1.5 GHz дискретно вследствие последовательного изменения продольной моды плазменно-пучкового резонатора [10].

При наличии меньшего количества нейтральных атомов в плазменном канале (рис. 4) ионизация газа полностью компенсируется уходом электронов, в результате чего частота излучения остается постоянной в течение всего импульса. Если же газ в начале процесса

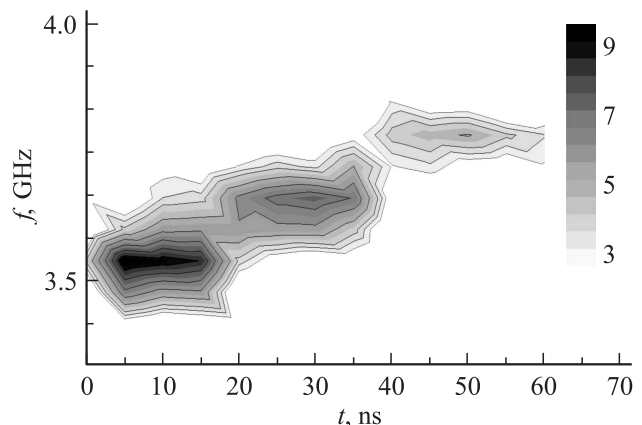
полностью ионизирован (рис. 5), то механизм роста концентрации плазмы отсутствует, и уменьшение числа электронов плазмы в течение импульса приводит к некоторому уменьшению частоты излучения.

Заметим, что изменение частоты излучения может происходить не только дискретно, как показано на рис. 3, но и непрерывно (рис. 5) при небольших изменениях концентрации плазмы, что было отмечено в [11]. На рис. 6 показан непрерывный рост частоты излучения ПРГ на 300 MHz в течение импульса. Иллюзию скачков с шагом 100 MHz создает выбор интервала времени в быстром преобразовании Фурье, с помощью которого обрабатывались осциллограммы сигналов для получения спектров. Создание численной „осциллограммы“ с линейным ростом частоты и ее обработка по тому же алгоритму показали результаты, аналогичные приведенным на рис. 6.

Таким образом, начальная концентрация плазмы определяет начальную частоту излучения ПРГ, а от степени



**Рис. 5.** Экспериментальная зависимость спектра СВЧ-излучения от времени при давлении газа  $0.8 \cdot 10^{-3}$  Торр. Уменьшение частоты излучения в течение импульса при полной начальной ионизации газа.



**Рис. 6.** Экспериментальная зависимость спектра СВЧ-излучения от времени при давлении газа  $1.3 \cdot 10^{-3}$  Торр. Непрерывный рост частоты излучения ПРГ при незначительном увеличении концентрации плазмы в течение импульса.

начальной ионизации газа зависит динамика дальнейшего изменения частоты. При полной начальной ионизации частота излучения уменьшается со временем в течение импульса, при наличии небольшого количества нейтральных атомов частота может оставаться постоянной, а при их значительном количестве, т.е. сравнительно высоком давлении газа, частота излучения растет.

Авторы благодарны сотрудникам ООО „Лекрой Рус“ за предоставленный осциллограф LeCroy WaveMaster (SDA) 820Zi-A, В.П. Тараканову за помощь в расчетах с использованием кода Карат, а также П.С. Стрелкову за полезные обсуждения.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований президиума РАН „Проблемы физической электроники, пучков заряженных частиц, генерации электромагнитного излучения в импульсных системах большой мощности“ при поддержке РФФИ, гранты № 10-08-00994-а и 12-08-00638-а.

## Список литературы

- [1] Лоза О.Т., Пономарев А.В., Стрелков П.С. и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 3. С. 222.
- [2] Стрелков П.С., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 4. С. 329.
- [3] Богданкевич И.Л., Гришин Д.М., Гунин А.В. и др. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 10. С. 926.
- [4] Богданкевич И.Л., Иванов И.Е., Лоза О.Т. и др. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 8. С. 748.
- [5] Лоза О.Т., Ульянов Д.К., Баранов Р.В. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 3. С. 98.
- [6] Лоза О.Т., Ульянов Д.К., Стрелков П.С. и др. // Краткие сообщения по физике. ФИАН. 2011. Т. 38. № 4. С. 47–50.
- [7] Цагарейшвили Н.С. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. № 11. С. 1389–1391.
- [8] Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT, Springfield, VA: Berkley Research Associates, Inc. 1992. 137 p.
- [9] Богданкевич И.Л., Лоза О.Т., Павлов Д.А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2010. № 2. С. 16–30.
- [10] Богданкевич И.Л., Лоза О.Т., Павлов Д.А. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 3. С. 211–218.
- [11] Богданкевич И.Л., Лоза О.Т., Павлов Д.А. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. № 15. С. 1–6.