

02;04;10

## **О стабильности частоты излучения плазменных релятивистских СВЧ-генераторов**

© И.Л. Богданкевич, О.Т. Лоза, Д.А. Павлов

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: loza@fpl.gpi.ru

Поступило в Редакцию 12 декабря 2006 г.

Изложены некоторые особенности работы СВЧ-генераторов, основанных на взаимодействии сильноточных релятивистских электронных пучков с плазмой. Частота их излучения зависит от концентрации плазмы, которая может меняться как в течение СВЧ-импульса, так и от импульса к импульсу, а величина изменений достигает нескольких процентов. Проанализирована зависимость частоты излучения от концентрации плазмы и возможности генерации стабильной частоты излучения в эксперименте. Показано, что возможна генерация СВЧ-импульсов с разбросом частоты, не превышающим естественную ширину спектра, определяемую длительностью импульса. Результаты получены путем расчетов и численного моделирования и сравниваются с известными экспериментальными данными.

PACS: 52.77.-j

Плазменный релятивистский СВЧ-генератор (ПРГ) — это широкополосный источник СВЧ-импульсов, который способен перестраивать частоту излучения в несколько раз [1]. При определенных условиях [2] ПРГ генерирует узкую спектральную линию, ширина которой не превышает естественной, т.е. определяемой длительностью импульса, а частоту можно изменять в 1.5–2 раза.

ПРГ представляет собой черенковский СВЧ-усилитель (плазменная лампа бегущей волны, ЛБВ), в которой самовозбуждение обеспечивается частичным отражением волны от торцов резонатора. Его устройство многократно описано (см. обзор [3]), и здесь мы подробности опускаем. Отметим только, что трубчатая плазма, играющая роль замедляющей системы, создается в результате ионизации остаточного газа с концентрацией  $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$  током специального электронного пучка, эмитированного кольцевым термокатодом [4].

Нестабильность параметров экспериментальной установки приводит к разбросу значений концентрации плазмы, который может достигать нескольких процентов и особенно велик в режиме одиночных импульсов. Кроме того, плазма меняется в течение СВЧ-импульса. Ионизация происходит при дрейфе электронов в скрещенных полях: радиальном электрическом поле пространственного заряда РЭП с напряженностью  $100 \text{ kV/cm}$  и ведущем магнитном поле  $\sim 1 \text{ Т}$ , а также под действием возникших СВЧ-полей примерно с такой же напряженностью электрической составляющей  $\sim 100 \text{ kV/cm}$ . В течение  $100 \text{ ns}$  концентрация плазмы может увеличиться на нескольких процентов. От концентрации плазмы зависит частота излучения ПРГ (частота, на которой коэффициент усиления максимален, растет почти линейно с ростом ленгмюровской частоты плазмы [4]), и поэтому возможность генерации СВЧ-импульсов со стабильной частотой излучения постоянно подвергается сомнению.

В данной работе авторы ставили целью исследовать возможность поддержания стабильной частоты излучения плазменного релятивистского СВЧ-генератора. Проведены оценки и расчеты в рамках линейной модели, часть результатов получена путем численного моделирования с помощью популярного кода „Карат“ [5].

Выше упоминалось, что обратная связь, необходимая для возникновения автоколебаний в плазменном СВЧ-генераторе, осуществляется при частичном отражении волн от границ резонатора. Как известно, в этом случае условия нарастания амплитуды и возникновения автоколебаний можно записать как

$$\kappa^2 e^{2\delta L} > 1. \quad (1)$$

Здесь  $\delta$  — погонный (линейный) коэффициент усиления поля волны,  $L$  — длина плазменно-пучкового взаимодействия,  $\kappa^2$  — коэффициент

отражения (по мощности) СВЧ-волны от границ. Другим известным условием генерации излучения в резонаторе является условие сохранения фазы после прохождения области взаимодействия в обоих направлениях, т.е. длины  $2L$ , и отражений от обеих границ:

$$k_z 2L + \varphi_0 = 2\pi N. \quad (2)$$

Здесь  $\lambda$  — длина волны,  $k_z = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\varphi_0$  — изменение фазы, связанное с отражением от границ,  $N = 1, 2, 3, \dots$  — номер продольной моды. Здесь подразумевается равенство длин двух плазменных волн: волны с нарастающей амплитудой и отраженной волны, распространяющейся без усиления. Хотя такое равенство и не совсем верно (разница имеет порядок 10%), примем это допущение для большей наглядности изложения. В этом случае получим известное соотношение — разность волновых чисел  $\Delta k_z$  для волн, индекс  $N$  которых отличается на единицу, равна:

$$\Delta k_z = \frac{\pi}{L}. \quad (3)$$

Для фиксированной концентрации плазмы, т.е. для неизменной дисперсионной характеристики плазменной волны групповая скорость волны  $V_{gr} = \partial\omega/\partial k_z \approx 2\pi\Delta f/\Delta k_z$ , где частота волны  $f$ , а круговая частота  $\omega = 2\pi f$ . Таким образом, в одном импульсе излучения ПРГ, когда плотность плазмы не меняется, может генерировать набор частот с интервалом:

$$\Delta f = \frac{V_{gr}}{2L}. \quad (4)$$

Генерацию частот излучения именно с таким интервалом ( $V_{gr} \approx 1.8 \cdot 10^{10}$  cm/s,  $L = 70$  cm,  $\delta f \approx 0.13$  GHz) наблюдали авторы [2].

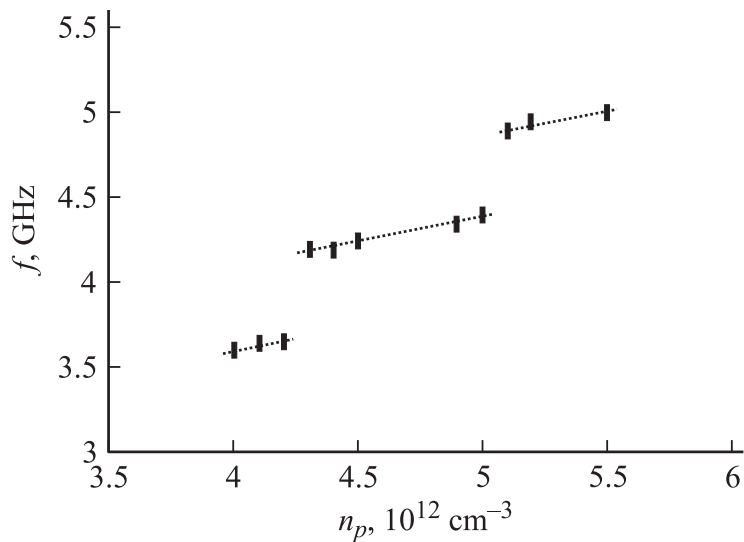
Расчеты пороговой длины  $L$ , необходимой для возникновения СВЧ-колебаний, проводились для конкретного набора параметров, который был реализован в эксперименте [1]: радиус волновода 1.8 cm, радиус коаксиального коллектора 1.2 cm, средний радиус трубчатого электронного пучка 0.75 cm, толщина 0.1 cm, средний радиус трубчатой плазмы 1.05 cm, толщина 0.1 cm, энергия электронов 500 keV, ток 2 kA. Расчеты проводились для нескольких значений концентрации плазмы.

Зависимость от частоты коэффициента усиления  $\delta$  рассчитывалась при решении соответствующего дисперсионного соотношения [4]. Для

определения коэффициента  $\kappa^2$  отражения волны от границы решалась сеточная задача отражения волнового пакета в пределе бесконечно тонкой трубчатой плазмы [6]. Полученные результаты позволили найти пороговые значения длины  $L$ , при которых формула (1) превращается в равенство. Оказалось, что пороговая длина  $L$  плазменного резонатора близка к длине волны излучения  $\lambda$ , при этом частота излучения в диапазоне изменения плазмы  $(4-5.5) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  изменяется приблизительно в полтора раза.

Для численного моделирования была выбрана длина пространства плазменно-пучкового взаимодействия в ПРГ 15 см. Частотный интервал между соседними продольными модами СВЧ-генератора можно оценить по формуле (4). Расчеты дисперсионных характеристик позволили определить средние значения групповой скорости плазменных волн в точках черенковского резонанса:  $V_{gr} \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ cm/s}$ . Таким образом, частоты, которые ПРГ с заданными выше параметрами и длиной 15 см может генерировать в одном импульсе, должны быть расположены с интервалом  $\Delta f \approx 0.7 \text{ GHz}$ . Можно ожидать, что при попытке генерации нескольких СВЧ-импульсов с одинаковой частотой имеющиеся в эксперименте флуктуации концентрации плазмы от импульса к импульсу не будут приводить к изменениям частоты. Это предположение подтверждается моделированием с помощью кода „Карат“ [5].

В численном эксперименте ПРГ с указанными выше параметрами „генерировал“ СВЧ-импульс с узким спектром. На рисунке показана зависимость частоты излучения от концентрации плазмы. Вертикальными линиями обозначена ширина спектра, она зависит от длительности интервала 20 ns, на котором определялся спектр СВЧ-импульса. Видно, что существуют интервалы изменения концентрации, где частота излучения растет медленно, со скоростью приблизительно  $0.3 \text{ GHz}/10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , а между этими интервалами изменение частоты происходит скачкообразно. Шаг изменения частоты (разница частот в начале или в конце соседних „ступенек“) совпадает с оценкой по формуле (4):  $\approx 0.8 \text{ GHz}$ . В эксперименте разброс значений концентрации плазмы в режиме генерации одиночных СВЧ-импульсов не превышает 5% (для частотно-периодического режима он значительно меньше), т.е.  $0.25 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  для рассматриваемого случая. Если значение концентрации выбрано в середине интервала „медленного“ изменения частоты (например,  $4.6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  на рисунке), то разброс частот излучения будет 75 MHz, т.е. порядка естественной ширины спектра импульса 50 MHz.



Зависимость частоты СВЧ-излучения  $f$  от концентрации плазмы  $n_p$ . Вертикальными линиями отмечена ширина спектра импульсов.

Из приведенных результатов оценок и расчетов следует, что плазменный релятивистский СВЧ-генератор может излучать приблизительно одну и ту же частоту от импульса к импульсу. При изменении концентрации плазмы частоты излучения меняется или слабо, или скачкообразно. Чтобы избежать значительного разброса частоты излучения от импульса к импульсу, достаточно задать шаг дискретного изменения частоты достаточно большим, выбрав соответствующую длину плазменно-пучкового взаимодействия. Методы стабилизации плотности плазмы, плавной регулировки частоты и ширины спектра излучения существуют и будут рассмотрены в последующих работах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (ГК № 02.452.11.7063), Президиума РАН (программа „Фундаментальные проблемы нано- и пикосекундной электроники большой мощности“) и Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 06-08-00758).

**Список литературы**

- [1] *Стрелков П.С., Ульянов Д.К.* // ФП. 2000. Т. 26. № 4. С. 329.
- [2] *Богданкевич И.Л., Иванов И.Е., Лоза О.Т.* и др. // ФП. 2002. Т. 28. № 8. С. 748–757.
- [3] *Кузелев М.В., Лоза О.Т., Рухадзе А.А.* и др. // ФП. 2001. Т. 27. № 8. С. 710–733.
- [4] *Лоза О.Т., Пономарев А.В., Стрелков П.С.* и др. // ФП. 1997. Т. 23. № 3. С. 222–229.
- [5] *Tarakanov V.P.* // Springfield, VA: Berkley Research Associates, Inc., 1992. 137 p.
- [6] *Карташов И.Н., Красильников М.А., Кузелев М.В.* // РиЭ. 1999. Т. 44. № 12. С. 1502–1509.