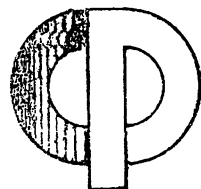


ISSN 0021—3462

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ



РАДИОФИЗИКА

1990

ТОМ 33

10

**ИЗДАНИЕ НИЖЕГОРОДСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
РАДИОФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА**

КАТОДНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В МОЩНЫХ ГИРОТРОНАХ*В. Е. Запевалов, С. А. Малыгин, В. Н. Мануилов, Ш. Е. Цимринг*

Одним из нежелательных эффектов, препятствующих увеличению выходной мощности МЦР, в которых используются винтовые электронные пучки, особенно при непрерывном режиме работы, является неустойчивость эмиссионного тока. Когда последний превышает некоторое пороговое значение, возникает неуправляемое нарастание эмиссии, которое заканчивается срывом колебаний или пробоем. Имеющиеся экспериментальные данные показывают, что при неустойчивых режимах катод подвергается интенсивной бомбардировке электронами, энергия которых сравнима с энергией электронов основного пучка. Причиной неустойчивости (см. например, [1]) является отражение от магнитной пробки в области нарастающего магнитного поля части электронов, осцилляторные скорости которых превосходят среднюю величину. Эти электроны оказываются запертыми в адиабатической ловушке. Неустойчивость такого состояния и связанное с ней возникновение интенсивных переменных полей образуют один из возможных механизмов, которые восстанавливают баланс заряженных частиц.

Ниже описываются эксперименты и результаты численного моделирования, которые указывают на существование неустойчивых режимов несколько иного типа. Эксперименты проводились с гиротроном, работавшим на второй гармонике циклотронной частоты. При некоторых режимах (типичные параметры: потенциал резонатора $U_p = 50$ кВ, анода $U_a = 35$ кВ, ток пучка $I \geq 10$ А) наблюдался срыв регулярных высокочастотных колебаний и резкое нарастание тока эмиссии при длительности импульса ~ 50 мкс. На рис. 1 (см. на вклейке), приведены зависимости от тока пучка выходной мощности гиротрона, работающего на моде H_{02} и оптимального (по КПД) тока вспомогательного соленоида, корректирующего распределение магнитного поля в прикатодной

области (соответственно кривые 1 и 2), при наличии неустойчивости ($U_p = 50$ кВ, $U_a = 35$ кВ, $\varphi = 7^\circ$). При превышении порогового тока выходная мощность резко уменьшается, а генерация носит в основном шумовой характер. (На рис. 1 приведена также форма импульса катодного тока.)

Указанная неустойчивость, хотя и имеет некоторое сходство с предыдущей* (нарастание тока эмиссии, интенсивные шумовые колебания), имеет некоторые характерные отличия.

Известно, что устранению неустойчивостей 1-го типа способствует помещение дополнительных электродов [1], перехватывающих отраженные электроны в области нарастающего магнитного поля. В описываемых экспериментах дополнительные электроды ни в качественном, ни в количественном отношении на наблюдаемые эффекты не влияли. Неустойчивость 1-го типа ослабляется при снижении анодного напряжения (за счет уменьшения осцилляторных скоростей электронов), тогда как неустойчивость 2-го типа имеет, наоборот, тенденцию к усилению. Наконец, в некотором диапазоне параметров неустойчивость 1-го типа сравнительно слабо влияет на эффективность взаимодействия (если с помощью специальных мер стабилизировать возросшую эмиссию), в то время как при неустойчивости 2-го типа колебания срываются немедленно.

Совокупность приведенных фактов указывает на то, что механизм неустойчивости 2-го типа не связан с отражением электронов от магнитной пробки, а определяется процессами, происходящими в непосредственной близости от эмиттера. Существенно, что использованная в экспериментах электронная пушка отличалась сравнительно малым углом φ наклона магнитного поля к поверхности эмиттера ($\varphi \approx 7^\circ$). При таких значениях φ пушка формирует пучок с перемешанными электронными траекториями (рис. 2), 1 — катод, 2 — анод, 3 — эмиттирующий пояс; траектории при $I = (2/3)I_s$, $t_i = 0,14$ [2].

Траекторный анализ этой пушки, проведенный по программе ЭПОС [3], показал, что по мере увеличения тока в рассматриваемой системе падает, а затем меняет знак продольная по отношению к магнитному полю компонента электрического поля $E_{||}$, определяющая инжекцию электронов из прикатодной области. В результате при некотором пороговом токе пучка I_s электроны, стартующие с левого края эмиттера, оказываются не в состоянии преодолеть потенциальный барьер, создаваемый облаком объемного заряда. Такие электроны совершают несколько колебаний над поверхностью эмиттера, а затем медленно дрейфуют в область более слабого магнитного поля и попадают на анод (рис. 2, пункт 1). Для системы рис. 2 подобный режим реализуется при $t_j = I/I_L \geq 0,2$ (I_L — ток, соответствующий режиму ограничения тока объемным зарядом). С увеличением ширины эмиттера I_s несколько возрастает. Так, для исследуемой пушки с вдвое большей шириной эмиттера отражение возникает, когда ток возрастает на 20%.

Траекторный анализ, модифицированный на случай отражений, показал, что при $I > I_s$ итерационный процесс становится неустойчивым (отсутствует сходимость как по траекториям, так и по скоростям). Появление отраженных электронов по мере увеличения числа итераций носит периодический характер, причем на отдельных итерациях отражается до половины электронов пучка. Указанная вычислительная неустойчивость, по-видимому, соответствует зарегистрированной экспериментально неустойчивости таких режимов. Обусловленное этими эффектами ухудшение качества пучка приводит к срыву колебаний рабочей моды.

Увеличение угла наклона φ магнитного поля к поверхности катода способствует возрастанию компоненты электрического поля $E_{||}$, ответственной за дрейф электронов в рабочем пространстве, а следовательно, устранению указанной неустойчивости. Изменение углов наклона магнитного поля в описываемом макете гиротрона легко достигается путем перемещения основного соленоида относительно ЭОС и соответствующего изменения магнитного поля корректирующей катушки. По экспериментальным данным для устранения неустойчивостей в ряде случаев оказался достаточным сдвиг соленоида всего на 1 см.

Наличие катодной неустойчивости препятствует увеличению выходной мощности МЦР, использующих магнетронно-инжекторные пушки. Кривые 3, 4 на рис. 1 иллюстрируют зависимость выходной мощности гиротрона, а также тока корректирующего катодного соленоида (см. выше) после устранения неустойчивости ($U_p = 50$ кВ, $U_a = 31$ кВ, $\varphi = 15^\circ$). Максимальная выходная мощность превысила 400 кВт (кпд 23%) при токе 36 А ($t_j \approx 0,33$) и была ограничена эмиссионной способностью катода и электрической прочностью промежутка катод—анод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цимринг Ш. Е. В кн.: Лекции по электронике СВЧ (3-я зимняя школа-семинар для инженеров). — Саратов: Гос. ун-т, 1974. Кн. 4. С. 3.
2. Мануилов В. Н., Цимринг Ш. Е. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1977. Вып. 4. С. 67.
3. Лыгин В. К., Мануилов В. Н., Цимринг Ш. Е. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1987. Вып. 7. С. 36.

Горьковский государственный
университет

Поступила в редакцию
5 мая 1989 г.

* Ниже для краткости она называется неустойчивостью 1-го типа, а описываемая неустойчивость — 2-го типа.

К ст. В. Е. Запелова и др.

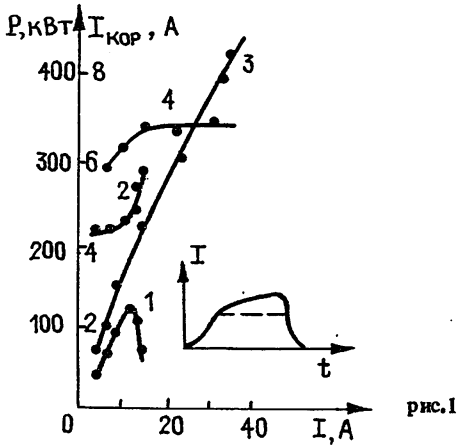


рис. 1

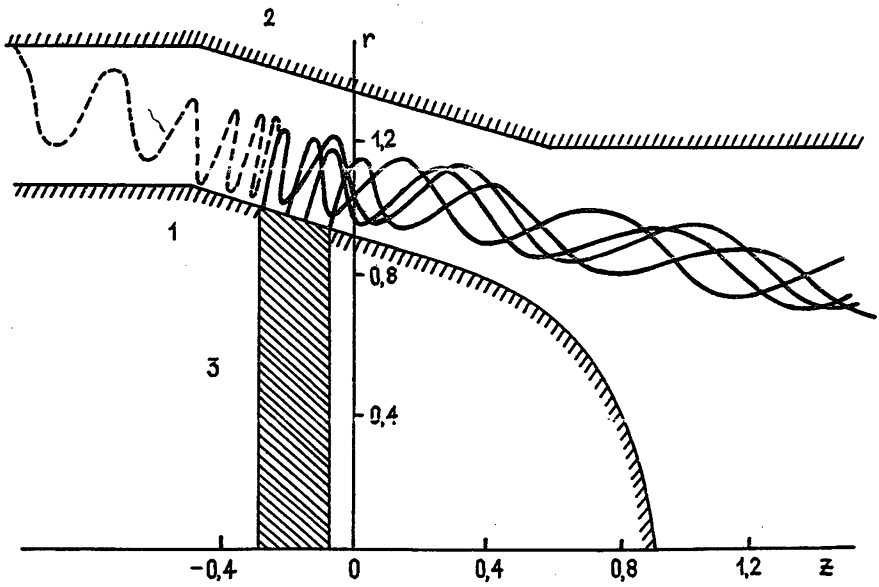


рис. 2