

УДК 621.385.6

ИССЛЕДОВАНИЕ СЦЕНАРИЯ ВКЛЮЧЕНИЯ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ГИРОТРОНА С РЕЛЯТИВИСТСКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Н. И. Зайцев, С. А. Запелов, А. В. Малыгин, М. А. Мусеев, А. С. Шевченко

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Приведены результаты исследования сценария включения мощного импульсного гиротрона на рабочей моде TE_{53} при двух вариантах вольт-амперной характеристики трёхэлектродной магнетронно-инжекторной электронной пушки. В стандартном варианте подачи напряжения на первый анод с резистивного делителя на фронте импульса регистрировалось последовательное включение мод TE_{73} и TE_{63} и, наконец, рабочей моды TE_{53} . Путём уменьшения скорости нарастания напряжения, подаваемого на первый анод, получена вольт-амперная характеристика, при которой возбуждалась только рабочая мода.

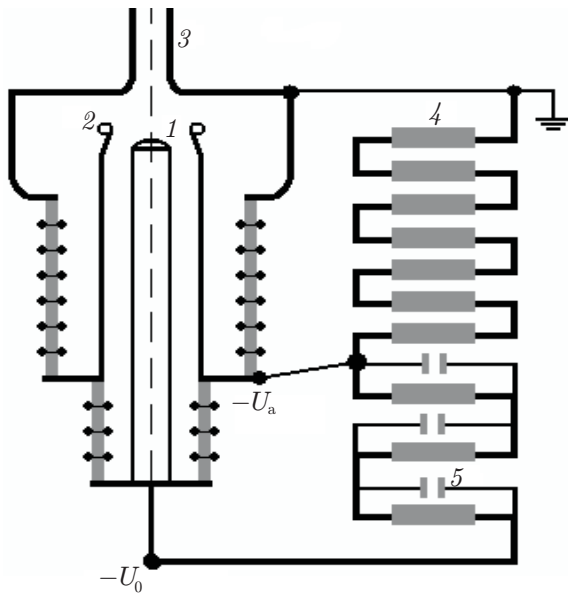


Рис. 1. Схема подачи напряжения на триодную магнетронно-инжекторную пушку: 1 — катод, 2 — первый анод, 3 — второй анод (земля), 4 — резистивный делитель, 5 — конденсаторы

При включении гиротрона на фронте импульса ускоряющего напряжения U_0 циклотронная частота изменяется вследствие изменения релятивистской массы электронов. В результате в мощных гиротронах при густом спектре собственных частот резонатора происходит каскадное, т. е. поочередное, возбуждение нескольких мод [1–3].

Каскадное возбуждение мод ограничивает возможности увеличения мощности излучения гиротрона при увеличении напряжения и тока электронного пучка и переходе к более высоким рабочим модам. Возрастает опасность сверхвысокочастотных пробоев при возбуждении паразитных мод вследствие отражения от выходного вакуумного окна, полностью согласованного только на частоте рабочей моды. В коротко-импульсных релятивистских гиротронах с длительностью импульса $T_{\text{и}} \approx 1$ мкс каскадное возбуждение мод затрудняет измерение мощности калориметрическим методом, поскольку энергия излучения, сосредоточенная в конкурирующих модах, становится соизмеримой с энергией излучения в рабочей моде [4]. В этих приборах каскадное возбуждение мод происходит при работе на существенно более низких модах, чем в классических гиротронах, вследствие увеличения рабочего тока, расширения диапазона перестройки циклотронной частоты и полосы циклотронного резонанса.

В настоящей работе приведены результаты исследования сценариев включения релятивистского гиротрона с частотой 30 ГГц и рабочей модой TE_{53} с возбуждением и без возбуждения мод TE_{63} и TE_{73} на микросекундном фронте питающего импульса.

Эксперименты выполнены на установке «Сатурн-Ф» [4] с трёхэлектродной магнетронно-инжекторной пушкой (рис. 1). Импульс питающего напряжения U_0 подавался на катод. Первый

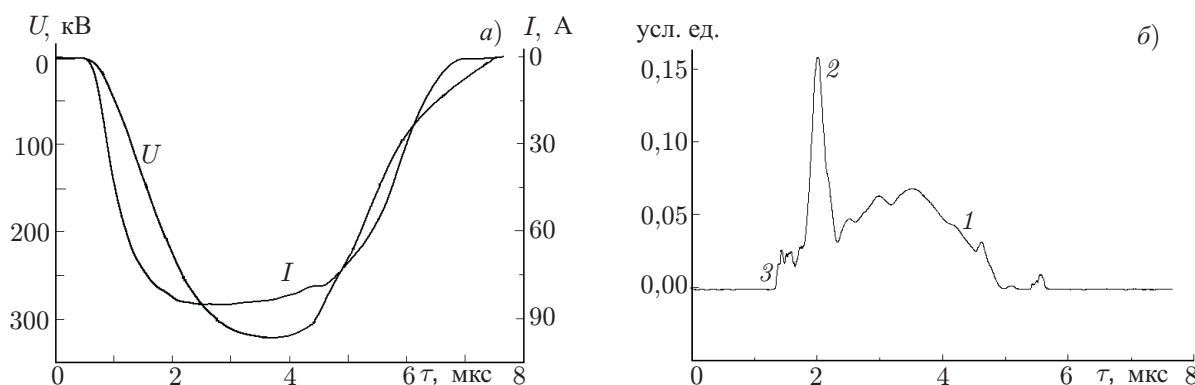


Рис. 2. Характерные осциллограммы напряжения U , тока пучка I (а) и сигнала с детектора (б). Кривые 1, 2 и 3 относятся к модам TE_{53} , TE_{63} и TE_{73} соответственно

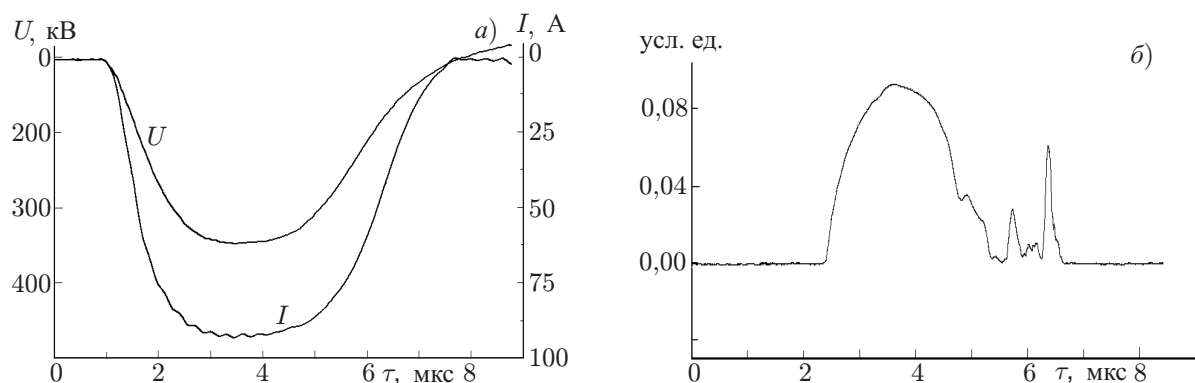


Рис. 3. Характерные осциллограммы напряжения U , пучка тока I (а) и сигнала с детектора (б) для моды TE_{53}

бестоковый анод запитывался через резистивный делитель. На рис. 2 показан импульс напряжения U_0 , ток пучка, сигнал с детектора и сигнал промежуточной частоты со смесителя. На сигнале с детектора видна генерация двух импульсов, предшествующая генерации рабочей моды TE_{53} . Частоты двух первых импульсов, измеренные гетеродинным методом, соответствовали модам TE_{63} и TE_{73} . По-видимому, большая амплитуда импульса моды TE_{63} по сравнению с другими связана с дисперсией измерительного тракта. Для подавления генерации конкурирующих мод была уменьшена скорость нарастания напряжения, подаваемого на первый анод. Как и в работе [5], это достигалось шунтированием низковольтного плеча резистивного делителя дополнительной ёмкостью (рис. 1). Соответствующие данному режиму импульсы напряжения U_0 , тока пучка, сигнал со сверхвысокочастотного детектора и сигнал промежуточной частоты со смесителя показаны на рис. 3. Видно, что на переднем фронте высоковольтного импульса происходит генерация только рабочей моды. На заднем фронте импульса присутствуют моды TE_{63} и TE_{73} , но меньшей амплитуды и длительности, чем в случае, проиллюстрированном на рис. 2. Вклад данных мод в энергию импульса, по крайней мере, на порядок меньше, чем рабочей моды и поэтому не вносит большой погрешности в измерение мощности рабочей моды калориметром. Генерация мод TE_{63} и TE_{73} возникает на заднем фронте импульса из-за запаздывания спада анодного напряжения относительно ускоряющего напряжения.

Таким образом, трёхэлектродная электронная пушка позволила реализовать сложный сценарий включения, обеспечивающий одномодовый режим установления рабочей моды. Измерения мощности калориметрическим методом производились только в режиме подавления мод TE_{63} и TE_{73} на переднем фронте импульса (рис. 3). Максимальная мощность P , полученная при на-

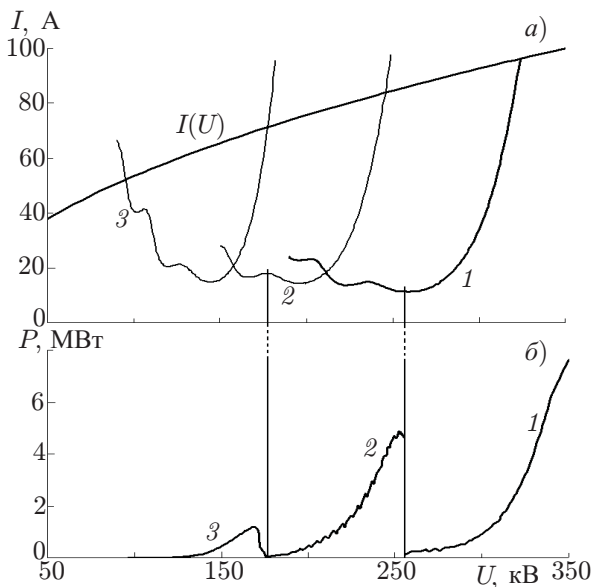


Рис. 4. Сценарий включения гиротрона при $U_a = aU_0$. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют модам TE_{53} , TE_{63} и TE_{73} соответственно

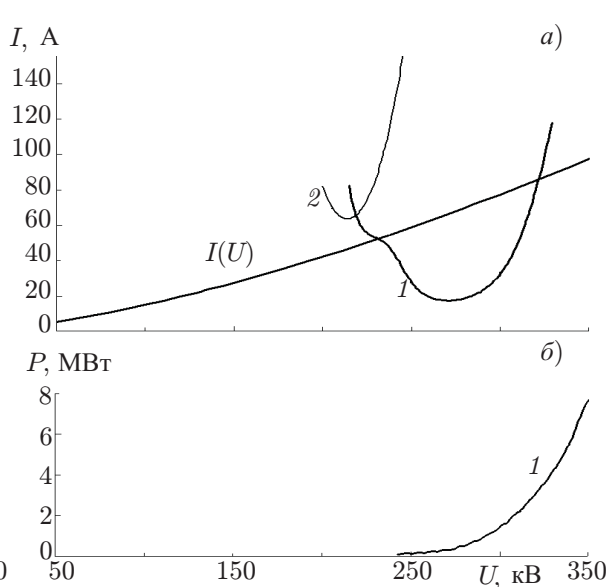


Рис. 5. То же, что на рис. 4, при $U_a = U_{a\text{стац}} \times (U_0/U_{0\text{стац}})^3$

пряжении $U_0 = 390$ кВ и токе электронного пучка $I_{\text{п}} = 80$ А, составляла 10 МВт при тактовой частоте 5 Гц.

Численное моделирование сценария включения гиротрона проводилось на основе системы дифференциальных уравнений, описанных в [6], в приближении самосогласованной структуры сверхвысокочастотного поля в резонаторе.

На фронте импульса ускоряющего напряжения U_0 расчётные значения тока пучка I и питч-фактора g изменялись следующим образом: $I = I_{\text{стац}} (U_a/U_{a\text{стац}})^{1/2}$, где $I_{\text{стац}}$ — ток пучка в максимуме импульса напряжения $U_{0\text{стац}}$, U_a — анодное напряжение на фронте импульса, $U_{a\text{стац}}$ — анодное напряжение в максимуме импульса напряжения $U_{0\text{стац}}$, $g = [t_{\perp\text{текущ}}/(1 - t_{\perp\text{текущ}})]^{1/2}$, где

$$t_{\perp\text{текущ}} = \frac{p_{\perp}^2}{p_0^2} = \frac{p_{\perp\text{стац}}^2 U_a^2}{(\gamma^2 - 1) U_{a\text{стац}}^2},$$

$\gamma = 1 + U_0[\text{кВ}]/511$, U_0 — текущее значение напряжения питания.

При квазидиодном сценарии включения гиротрона $U_a = aU_0$, где $a = \text{const}$ в любой момент времени на фронте импульса (рис. 4). Из расчёта видно, что старту рабочей моды TE_{53} предшествует старт мод TE_{63} и TE_{73} , что хорошо соответствует результатам, полученным в эксперименте (рис. 2).

Сценарий включения, соответствующий рис. 3, моделирующей реальную временную зависимость, был рассчитан при следующей зависимости анодного напряжения от напряжения питания: $U_a = U_{a\text{стац}} (U_0/U_{0\text{стац}})^3$, см. рис. 5. Питч-фактор на фронте импульса был уменьшен за счёт снижения скорости нарастания напряжения, подаваемого на первый анод U_a . При этом стартовые токи мод TE_{73} и TE_{63} увеличились и стали больше рабочего тока на всём протяжении импульса. Таким образом, как видно из рис. 5, старту рабочей моды TE_{53} не предшествует старт мод TE_{73} и TE_{63} , что также хорошо соответствует экспериментальным результатам.

Таким образом, проведено экспериментальное исследование сценария включения релятивистского гиротрона с триодной магнетронно-инжекторной пушкой. Рассмотрен квазидиодный сцена-

рий включения, при котором старту рабочей моды предшествует старт мод TE_{63} и TE_{73} . За счёт уменьшения скорости нарастания напряжения, подаваемого на первый анод, реализован сценарий включения гиротрона, при котором старту рабочей моды не предшествует генерация мод TE_{63} и TE_{73} . Результаты численного самосогласованного моделирования, проведённого при двух разных зависимостях анодного напряжения от напряжения питания, были близки с экспериментальными. Использование неквазидиодных сценариев включения открывает возможности дальнейшего увеличения мощности гиротронов с густым спектром собственных частот паразитных мод при переходе на более высокие рабочие моды. Также уменьшается опасность возбуждения паразитных мод вследствие отражения от выходного окна и нагрузки. Кроме того, расширяются возможности оптимизации резонаторов для достижения максимального КПД, когда рабочая мода характеризуется жёстким режимом возбуждения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 07-02-00665) и федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы. (госконтракт 02740110015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nusinovich G. S. Introduction to the physics of gyrotrons. Baltimore, London: The Johns Hopkins University Press, 2004.
2. Нусинович Г. С. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1974. № 3. С. 44.
3. Денисов Г. Г., Запевалов В. Е., Литвак А. Г., Мясников В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 10. С. 845.
4. Zaitsev N. I., Zapevalov S. A., Pyakov E. V., et al. 500 keV, 200 A microsecond electron accelerator with a repetition rate of 10 Hz: // XXI Conference on charged particle accelerators. 2008. Rep. No. ТНВН09.
5. Запевалов В. Е., Малыгин С. А., Цимринг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1993. Т. 36, № 6. С. 543.
6. Bratman V. L., Ginzburg N. S., Nusinovich G. S., et al. // Int. J. Electronics. 1981. V. 51, No. 4. P. 541.

Поступила в редакцию 23 ноября 2009 г.; принята в печать 3 марта 2010 г.

STUDY OF THE SCENARIO OF SWITCHING-ON OF A PULSED GYROTRON WITH A RELATIVISTIC ELECTRON BEAM

N. I. Zaitsev, S. A. Zapevalov, A. V. Malygin, M. A. Moiseev, and A. S. Shevchenko

We present the results of studying the scenario of switching-on of a high-power pulsed gyrotron operated at the TE_{53} mode for two variants of the current-voltage characteristic of the three-electrode magnetron-injection electron gun. In the standard variant of feeding voltage to the first anode from the resistive divider, sequential switching-on of the modes TE_{73} and TE_{63} , and, finally, the operating TE_{53} mode was observed at the edge of the pulse. The current-voltage characteristic, at which only the operating mode was excited, was obtained by decreasing the growth rate of the voltage sent to the first anode.