УДК 621.385.69, 621.3.029.65

Розенталь Р.М., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Зотова И.В., Малкин А.М., Сергеев А.С.

Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной физики РАН

Генерация «волн-убийц» терагерцового диапазона в гиротроне планарной конфигурации

Показано, что в планарной конфигурации гиротрона при запитке сильноточным винтовым пучком возможно создание условий для возникновения "волн-убийц" – ультракоротких импульсов с пиковой мощностью, превышающей мощность невозмущенного электронного потока. В рамках моделирования процессов электронно-волнового взаимодействия в терагерцовом диапазоне получены импульсы с пиковой мощностью в сотни мегаватт.

Ключевые слова: планарный гиротрон, волны-убийцы, терагерцовое излучение

Одной из перспективных схем генераторов мощного терагерцового излучения являются гиротроны планарной конфигурации, преимуществом которых является возможность обеспечения когерентности излучения при большем факторе сверхразмерности за счет дифракционного механизма селекции мод по открытой поперечной координате и синхронизации излучения различных фракций ленточного поливинтового электронного пучка поперечными потоками энергии [1,2].

При этом, за счет уменьшения расстояния между пластинами резонатора, можно реализовать уровень надкритичности, достаточный для возникновения "волн-убийц" – ультракоротких импульсов с пиковой мощностью, превышающей мощность невозмущенного электронного потока [3].

Для описания работы планарного гиротрона в условиях большой надкритичности использовалась нестационарная самосогласованная система уравнений, учитывающая изменение продольного импульса электронов в пространстве взаимодействия:

$$
\begin{gathered}
i\frac{\partial^2 a}{\partial Z^2}+\frac{\partial a}{\partial \tau}=\frac{iI_0}{2\pi}\int_0^{2\pi}\frac{\hat{p}_\perp}{\hat{p}_\parallel}d\theta_0,\\
\left[\frac{\partial}{\partial Z}+\frac{g^2}{4}\frac{\partial}{\partial \tau}\right]p_\perp+i\frac{p_\perp}{p_\parallel}\left(\Delta-1+\left|p_\perp\right|^2+\frac{{p_\parallel}^2-1}{g^2}\right)=i\frac{a}{\hat{p}_\parallel}+\frac{\beta_{\perp 0}^2}{2}\frac{\partial a}{\partial Z}\\
\left[\frac{\partial}{\partial Z}+\frac{g^2}{4}\frac{\partial}{\partial \tau}\right]p_\parallel=-g^2\frac{\beta_{\perp 0}^2}{2}\mathrm{Re}\left(\frac{\partial a}{\partial Z}\frac{{p_\perp}^*}{p_\parallel}\right)
\end{gathered}
\tag{1}
$$

где $a(Z,\tau)$ – нормированная амплитуда поля, Z,τ – продольная координата и время, $p_\perp, p_\parallel$ – поперечный и продольный импульсы, I_0 – параметр тока, Δ – расстройка между

критической частотой рабочей моды и невозмущенным значением гирочастоты, g – питч-фактор.

На основании самосогласованных уравнений (1) была рассмотрена динамика гиротрона, запитываемого электронным пучком с энергией 200 кэВ, линейной плотностью тока 2 кА/см током 2 кА и питч-фактором 1.0. Рассматривалось взаимодействие пучка с низшей ТЕ-модой планарного волновода в ведущем магнитном поле ~15 Тл в диапазоне 300 ГГц. Все процессы анализировались на временном интервале в несколько десятков наносекунд, что соответствует характерной длительности импульсов в сильноточных системах на основе взрывоэмиссионных катодов.

Моделирование показало, что в достаточно широком диапазоне магнитных полей в системе возможна генерация волн-убийц с пиковой мощностью в несколько сотен мегаватт (Рис.1). Вместе с тем, поскольку появление гигантских импульсов носит случайный характер, при незначительной вариации начальных условий пиковая мощности на ограниченном временном интервале может меняться в несколько раз.

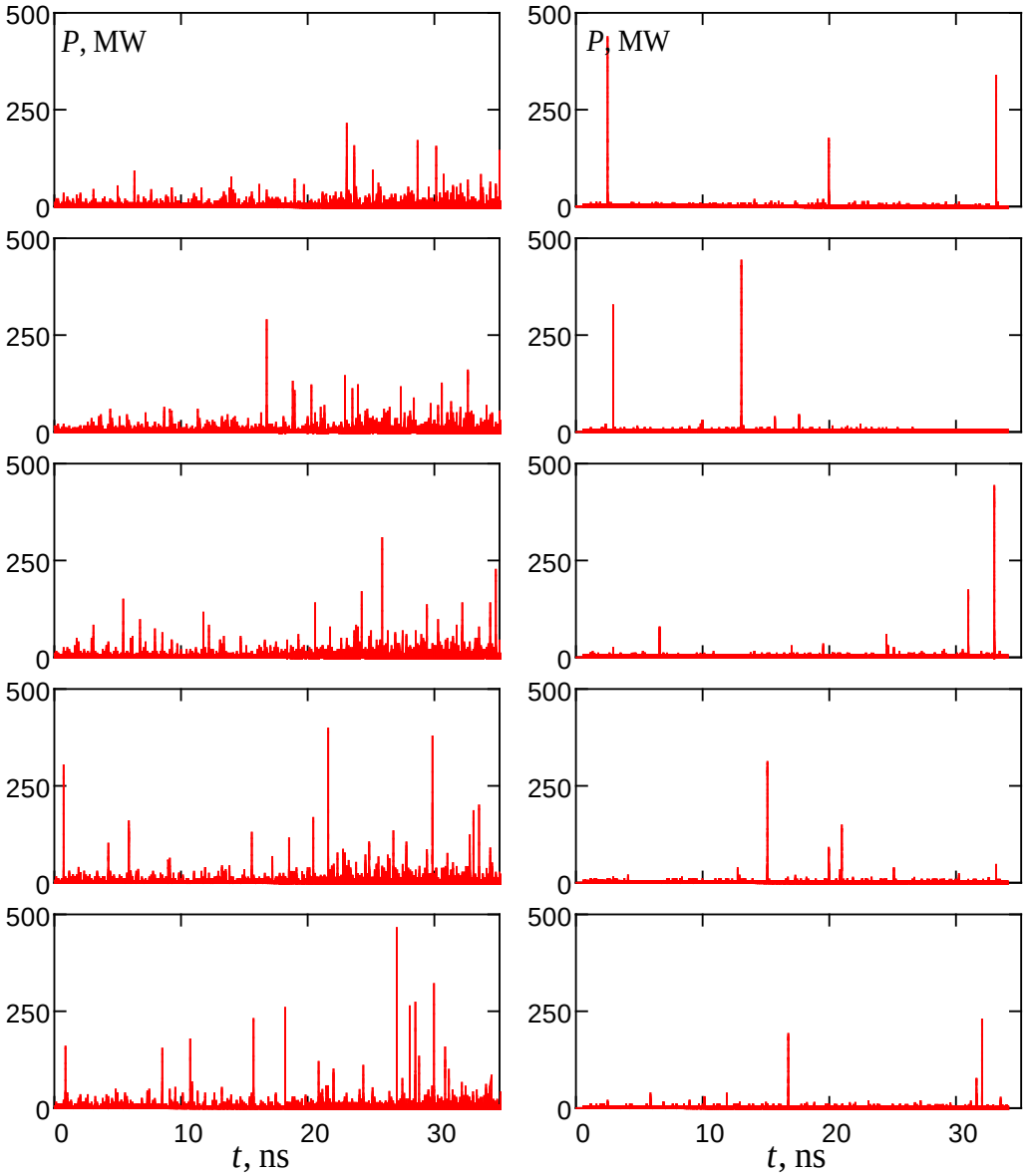

Рис.1. Форма выходного сигнала в серии импульсов с различными начальными условиями: слева – моделирование усредненных уравнений (1), справа – PIC-моделирование.

Аналогичные результаты были получены и в рамках моделирования планарного гиротрона в рамках двумерной версии PIC-кода KARAT [4]. Геометрия системы представлена на рис.2. PIC-моделирование подтвердило возможность генерации импульсов с пиковой мощностью в сотни мегаватт с сильной чувствительностью к начальным условиям (Рис.1). Характерная длительность одного гигантского импульса составляла ~10 пс, общая ширина спектра излучения достигала 150 ГГц (Рис.3).

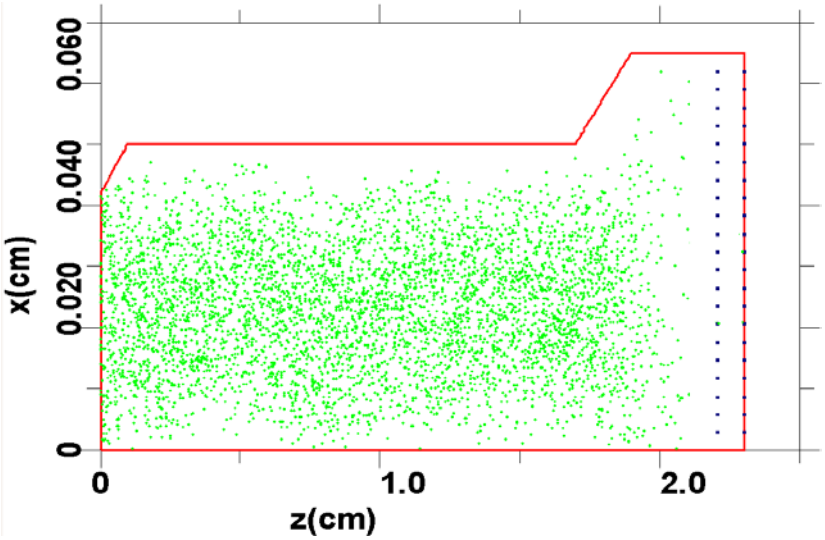

Рис.2. Геометрия пространства взаимодействия и мгновенное положение макрочастиц в PIC-моделировании.

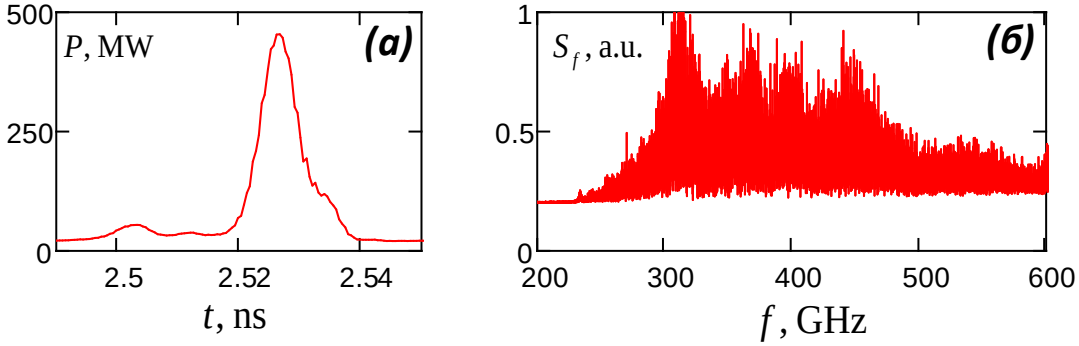

Рис.3. Результаты PIC-моделирования: (а) – характерная форма ультракороткого импульса (волны-убийцы); (б) – полный спектр выходного излучения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 17-08-01077.

Библиографический список

1. N. S. Ginzburg, I.V. Zotova, A. S. Sergeev, V.Yu. Zaslavsky, and I.V. Zheleznov. High-Power Terahertz-Range Planar Gyrotrons with Transverse Energy Extraction // Phys.Rev.Lett. 2012. V.108. Art.no. 105101.

2. V. Yu. Zaslavsky, N. S. Ginzburg, M. Yu. Glyavin, I. V. Zheleznov, and I. V. Zotova. Three-dimensional particle-in-cell modeling of terahertz gyrotrons with cylindrical and planar configurations of the interaction space // Phys. Plasmas. 2013. V. 20. Art.no. 043103.

3. Ginzburg N.S., Rozental R.M., Sergeev A.S., Fedotov A.E., Zotova I.V., Tarakanov V.P. Generation of Rogue Waves in Gyrotrons Operating in the Regime of Developed Turbulence // Phys. Rev. Lett. 2017. V.119. Art.no. 034801.

4. V. P. Tarakanov. Code KARAT in simulations of power microwave sources including Cherenkov plasma devices, vircators, orotron, E-field sensor, calorimeter etc. // EPJ Web of Conferences. 2017. V. 149. Art.no. 04024.