

*Абубакиров Э.Б., Конюшков А.П., Розенталь Р.М., Федотов А.Э.
Институт прикладной физики РАН*

Моделирование сильноточного релятивистского гиротрона миллиметрового диапазона

Выполнено моделирование релятивистского гиротрона с длиной волны 10 мм, запитываемого электронным пучком с энергией 500 кэВ и током 2 кА. Показана возможность селективного возбуждения одной моды электродинамической системы с выходной мощностью 180-200 МВт.

Ключевые слова: релятивистский гиротрон, миллиметровое излучение.

Релятивистские гирорезонансные приборы с сильноточными электронными потоками являются возможным кандидатами на получение СВЧ-излучения миллиметрового диапазона длин волн при уровнях мощности в сотни мегаватт [1-3]. В начале 2000-х годов было теоретически показано, что надлежащий подбор продольных распределений амплитуды высокочастотного поля и индукции статического магнитного поля в выходной части пространства взаимодействия гиротрона позволяет достичь высокого КПД даже при сильном релятивизме электронов [4]. Впоследствии эти теоретические положения были подтверждены и экспериментально реализацией релятивистских гиротронов с термокатодными пушками в сантиметровой и длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн [5,6].

Моделирование показывает, что селективные свойства резонаторов гиротронов сохраняются и при уменьшении их длины вплоть до полутора длин волны, что позволяет использовать для их запитки электронные пучки с килоамперными токами. В результате при умеренных требованиях к качеству сильноточного винтового пучка с энергией 500 кэВ и током в единицы килоампер (питч-фактор ~ 1 , начальный разброс ведущих центров $\sim \lambda/2$, начальный разброс по поперечным скоростям $\sim 50\%$) возможно получение режима одномодовой генерации с КПД не менее 15%.

Традиционный для гиротронов метод формирования винтового электронного пучка с помощью магнетронно-инжекторной пушки неприменим в случае взрывоэмиссионных инжекторов, используемых для генерации сильноточных потоков, из-за невозможности локализации на катоде области эмиссии электронов. Поэтому винтовой пучок предполагается формировать электронно-оптической системой, включающей коаксиальный диод с магнитной изоляцией, создающий прямолинейный трубчатый пучок, кикер в виде одной или двух катушек, расположенных предельно близко к пучку и создающих поперечное магнитное поле для раскачки частиц, и область компрессии пучка в нарастающем магнитном поле [2,7]. Аналитические оценки, основанные на результатах, изложенных в работе [7], показывают реалистичность получения сильноточного винтового пучка с требуемыми питч-фактором и скоростным разбросом в длинноволновой части миллиметрового диапазона.

Для детального анализа процессов электронно-волнового взаимодействия использовалась трёхмерная версия PIC-кода KARAT. Резонатор гиротрона представлял собой короткий ($2 \div 3$ длины волны) участок цилиндрического волновода, ограниченный с

катодного конца закритическим сужением, а с коллекторного конца – выходным волноводом, в конце которого располагался участок поглотителя с малым уровнем отражения (рис.1). Вычисления выполнялись в декартовой системе координат при точности сетки 10 узлов на длину волны по продольной координате и 15 узлов на одну вариацию поля по поперечным координатам и количестве частиц от 400 000 до 600 000 (в зависимости от тока пучка). Проверочные расчёты с увеличенными точностью сетки и числом частиц не выявили существенных отклонений от полученных результатов.

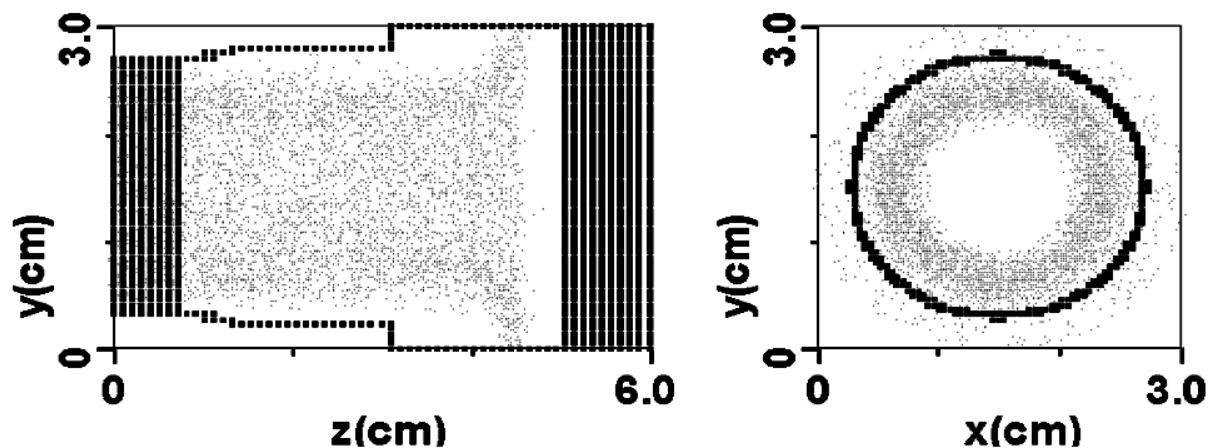


Рис.1. Геометрия пространства взаимодействия для гиротрона с длиной волны 1 см и мгновенное положение макрочастиц в трехмерном PIC-моделировании.

Для параметров функционирующего в ИПФ РАН сильноточного ускорителя "Синсус-6" (энергия частиц 500 кэВ, ток до 5 кА, длительность импульса тока 20 нс) была проведена оптимизация геометрии резонатора гиротрона. Электронный импульс задавался в форме трапеции с длительностью фронтов и "полочки" 5 нс и 10 нс, соответственно. В инжектируемом пучке задавался разброс по начальным энергиям 4% и разброс по поперечным начальным скоростям 60%.

В моделировании на длине волны 1 см при запитке пучком с энергией частиц 500 кэВ и током 2 кА в резонаторе гиротрона селективно возбуждалась мода $TE_{3,2}$ с выходной мощностью на уровне 180÷200 МВт (рис.2,3). Оптимальное значение магнитного поля составляет порядка 1.6 Тл. Возможности дальнейшего повышения мощности излучения путём увеличения тока пучка ограничивались нарастанием провисания потенциала в пространстве взаимодействия и, как следствие, ростом числа отраженных электронов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-08-01001.

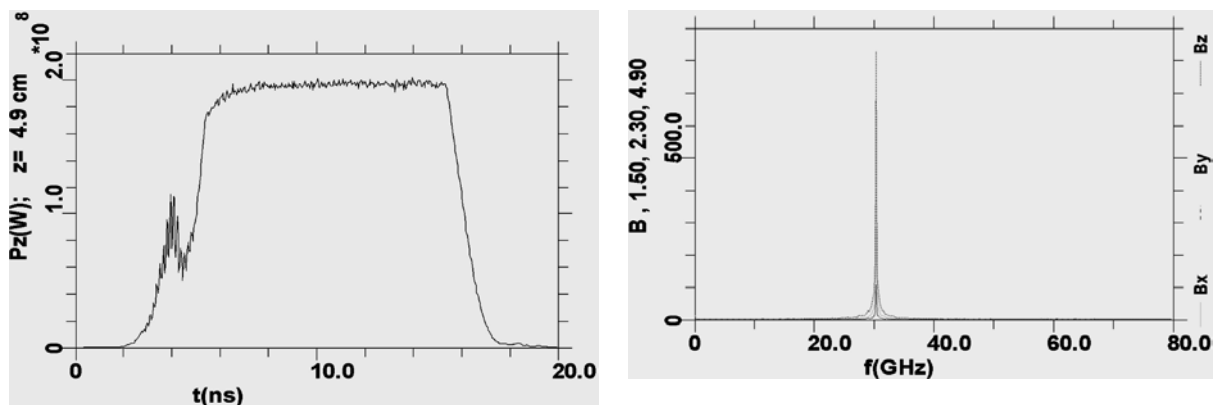


Рис.2. Результаты трехмерного PIC-моделирования: импульс СВЧ мощности и спектр излучения на "полке" импульса.

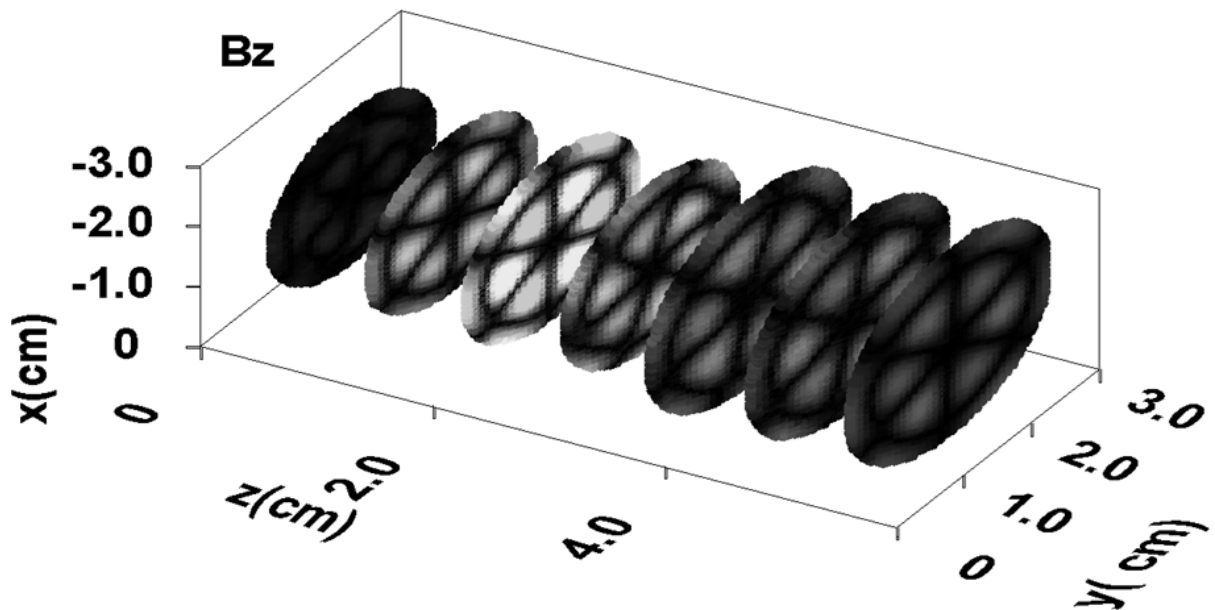


Рис.3. Пространственная структура волны TE₃₂, возбуждаемой в сильноточном релятивистском гиротроне, рассчитанная с помощью трехмерного PIC-моделирования.

Библиографический список

1. И.Е. Ботвинник, В.Л. Братман, Г.Г. Денисов, М.М. Офицеров. Релятивистские гиротроны с высокоселективными резонаторами на моды поперечно-магнитного типа // Письма в ЖТФ, 1984, т. 10, № 13, с.792-796.
2. V.L. Bratman, G.G. Denisov, M.M. Ofitserov, et al. Mm-wave relativistic electron oscillators. // IEEE Trans. on Plasma Science. 1987. V. 15, No. 1. P. 2–15.
3. V.L. Bratman, A.E. Fedotov, Y.K. Kalynov, V.N. Manuilov, M.M. Ofitserov, S.V. Samsonov, A.V. Savilov. Moderately relativistic high-harmonic gyrotrons for millimeter/submillimeter wavelength band // IEEE Trans. on Plasma Science. 1999. V. 27, No. 2. P. 456–461.
4. M.A. Moiseev, V.E. Zapevalov, and N.A. Zavolsky. Efficiency Enhancement of the Relativistic Gyrotron // International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Vol. 22, No. 6, 2001, p.813-833.
5. N.I. Zaitsev, N.S. Ginzburg, E.V. Пыakov, I.S. Kulagin, V.K. Lygin, V.N. Manuilov, M. A. Moiseev, R.M. Rosenthal, V.E. Zapevalov, N.A. Zavolsky. X-Band High-Efficiency Relativistic Gyrotron // IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 30, No. 3, June 2002, p.840-845.
6. Н.И.Зайцев, Н.А. Завольский, В.Е.Запеевалов, Е.В. Иляков, И.С. Кулагин, В.К. Лыгин, М.А. Моисеев, В.Е. Нечаев, М.И.Петелин, Р.М. Розенталь. Десятигигаваттный импульсный гиротрон с длиной волны 1 см и КПД 50% // Изв. вузов. Радиофизика, 2003, т.46, №10, с.914-918.
7. В.Л. Братман, Г.Г. Денисов, Д.А. Луковников, М.М. Офицеров. Критичность систем формирования винтового электронного пучка в МЦАР к позиционному разбросу частиц // ЖТФ. 1991. Т. 611, вып. 4. С. 111–117.