

РАЗРАБОТКА РЕЛЯТИВИСТСКОГО ГИРОТРОНА НА ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКЕ ГИРОЧАСТОТЫ СО СВЯЗАННЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ

DEVELOPMENT OF RELATIVISTIC GYROTRON WITH THE COUPLED CAVITIES, OPERATING AT THE THIRD HARMONIC OF GYROFREQUENCY

Н.А.Завольский¹, Е.В.Иляков¹, Ю.К.Калынов¹, И.С.Кулагин¹, (ORCID: 0000-0002-1216-6580) / ikulagin@ipfran.ru, В.Н.Мануилов^{1,2}, А.С.Шевченко¹

N.A.Zavolsky¹, E.V.Ilyakov¹, Yu.K.Kalynov¹, I.S.Kulagin¹, V.N.Manuilov^{1,2}, (ORCID: 0000-0002-1216-6580), A.S.Shevchenko¹

¹Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

²Нижегородский государственный университет, г. Нижний Новгород

Для селекции рабочей моды в гиротроне применены электродинамически связанные резонаторы, каждый из которых по отдельности не возбуждается. Методом крупных частиц проверено возбуждение общей моды. К экспериментам подготовлен винтовой электронный пучок высокого качества.

To discriminate the operating mode in gyrotron, the electro-dynamically coupled cavities are applied, which are not excited separately. Excitation of mutual mode has been tested by the PIC method. The helical electron beam of high quality has been prepared for experiments

Ключевые слова: *гиротрон, циклотронная гармоника, резонатор, связанные резонаторы, рабочая мода, селекция мод.*

Key words: *gyrotron, cyclotron harmonic, cavity, coupled cavities, operating mode, mode discrimination.*

ВВЕДЕНИЕ

Оптимистичный прогноз в освоении больших мощностей в миллиметровом диапазоне длин волн основывается на отличительном свойстве гирорезонансных приборов - их способности работать с развитыми в поперечном сечении электродинамическими системами, что упрощает решение проблем электропрочности приборов и формирования пучков с большими токами. Дальнейшее продвижение релятивистских гиротронов, обычно работающих на основном циклотронном резонансе, в направлении увеличения частоты требует соответствующего увеличения индукции магнитного поля, что ведет к усложнению и удорожанию магнитной системы. Этого предлагается избежать путем перехода к работе гиротрона на второй и третьей циклотронных гармониках. Однако работа на высоких гармониках сопряжена с ухудшением селективности ввиду добавления опасных паразитных мод, синхронных с пучком на низших гармониках. Если при работе гиротрона на второй гармонике помимо соседних мод на второй гармонике следует опасаться мод резонатора, возбуждаемых на основном циклотронном резонансе, то на третьей гармонике добавляются паразитные моды на второй гармонике. Для обеспечения селективной работы гиротрона на третьей гармонике предлагается применение электродинамической системы в виде двух связанных резонаторов с трансформацией мод (СРТМ) [1, 2]. Система представляет собой две электродинамически связанные секции различного диаметра, рассчитанные на возбуждение на одной частоте рабочих мод с одинаковым азимутальным индексом и разными радиальными индексами. На рабочей частоте в резонаторе возбуждается единая продольная полевая структура, взаимодействующая с электронным пучком в условиях соответствующего циклотронного

резонанса. Селективность обеспечивается выбором рабочей моды для первой секции достаточно свободной от паразитных колебаний.

1. ВЫБОР РАБОЧЕЙ МОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАСЧЕТА

При расчете гиротрона на третьей гармонике гирочастоты использовалась нестационарная модель взаимодействия с нефиксированной структурой высокочастотного поля. Параметры винтового электронного пучка (энергия электронов 280 кэВ, диаметр пучка 9 мм, питч-фактор 1,3, разброс по поперечным скоростям 30% при величине магнитного поля 1,37 Тл) соответствовали выбранной комбинации рабочих мод в связанных резонаторах: во входном длиной 22 мм и диаметром 12.78 мм – мода TE_{9.1}, в выходном – длиной 26 мм и диаметром 22.674 мм – мода TE_{9.3} (рис. 1).

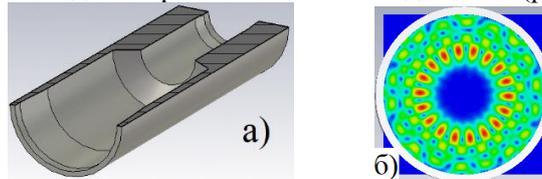


Рис. 1. Сечение резонатора гиротрона (а) и структура поля рабочей волны TE_{9.3} (б).

Связь между частями резонатора, приводящая к образованию единой комбинационной моды, проявляется в том, что радиальная вариация моды TE_{9.1} при переходе в широкий объем выходной части образует внутреннюю вариацию моды TE_{9.3}, а две недостающие внешние вариации моды TE_{9.3} возникают в ходе трансформации мод при равенстве резонансных частот двух составных частей резонатора. Расчетная частота генерации на третьей гармонике 80 ГГц.

Спектр возможных мод выходной части резонатора, где формируется мода TE_{9.3}, показан на рис. 2. Здесь только моды с 3-й циклотронной гармоникой ($n=3$) будут возбуждаться в окрестности частоты 80 ГГц. Моды с $n=2$ и $n=1$ будут принадлежать своим частотным диапазонам (соответственно 2/3 и 1/3 от 80 ГГц).

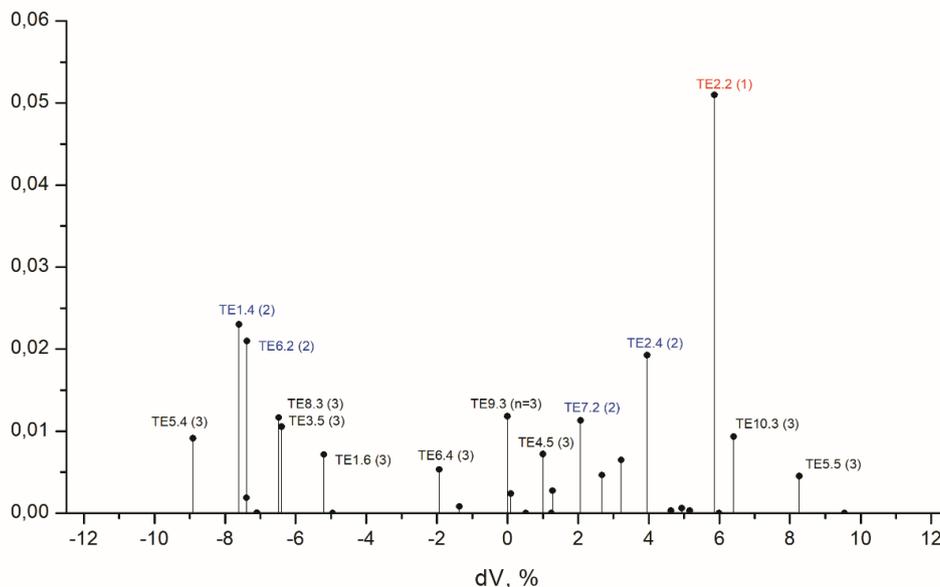


Рис.2. Расчетный спектр возможных мод, рассчитанный для выходной части резонатора. По горизонтали отложено относительное отклонение частоты от частоты рабочей волны TE_{9.3} (80 ГГц), по вертикали – фактор возбуждения. В скобках указан номер циклотронной гармоники (свой цвет для каждого номера).

Видно, что спектр в окрестности рабочей моды не показывает ее явного преимущества, так что приходится применять дополнительную селекцию мод в виде входной секции с той же резонансной частотой 80 ГГц на моде TE9.1, электродинамически связанной с выходной секцией. Сама по себе электродинамическая связь не только увеличивает длину пространства взаимодействия для этой комбинации мод, но и выделяет азимутальный индекс 9, существенно повышая возможность селективного возбуждения комбинации мод TE9.1 – TE9.3.

Расчетный спектр, рассчитанный для входной части резонатора, показан на рис. 3.

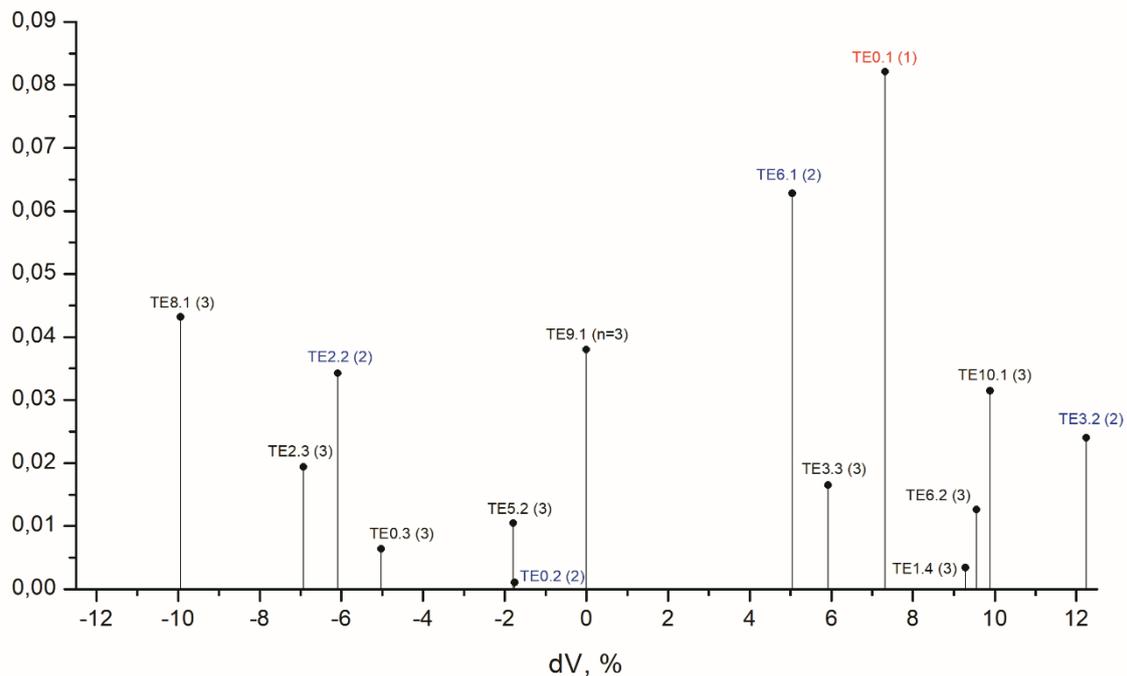


Рис.3. Расчетный спектр возможных мод, рассчитанный для входной части резонатора. По горизонтали отложено относительное отклонение частоты от частоты рабочей волны TE9.1 (80 ГГц), по вертикали – фактор возбуждения. В скобках указан номер циклотронной гармоники (свой цвет для каждого номера).

Расчет при токе 50 А показывает, что выходная мощность такого гиротрона составляет 2 МВт при КПД 14.5%.

Следует отметить, что небольшая неточность изготовления диаметра входной секции резонатора (± 10 мкм) не сказывается на стартовом токе гиротрона, составляющем $2 \div 3$ А и мало влияет на его выходные параметры (рис. 4).

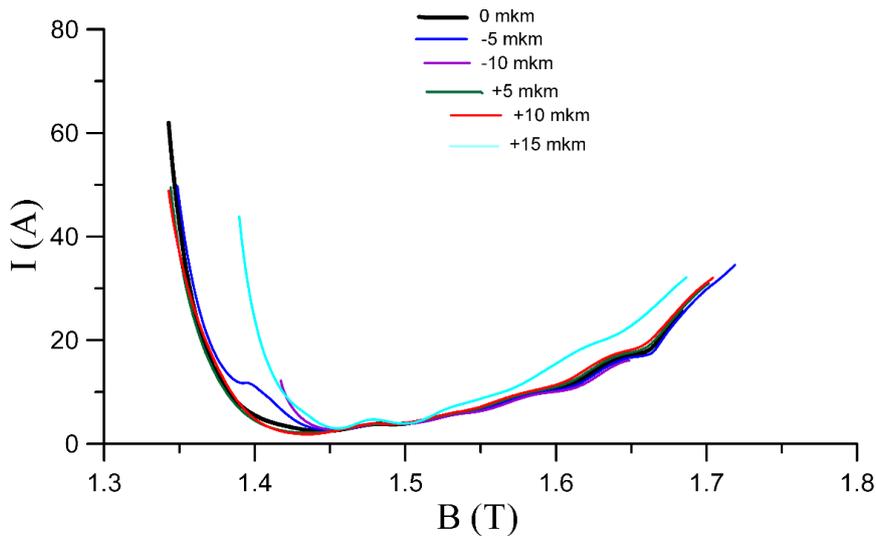


Рис.4. Стартовый ток гиротрона в зависимости от магнитного поля при различных отклонениях диаметра входной секции.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КРУПНЫХ ЧАСТИЦ

Результаты компьютерного моделирования гиротрона со связанными резонаторами методом крупных частиц сводятся к следующему.

1. При номинальных параметрах пучка (280 кВ, 50 А, диаметр 9 мм, питч-фактор 1.3) оптимальная настройка магнитного поля (1.40 Тл) не приводит к возбуждению какой-либо паразитной генерации. Установившаяся выходная мощность на рабочей частоте 79.39 ГГц составляет примерно 1.0 МВт при КПД 7.3%. При этом оказывается, что секции резонатора работают несогласованно: генерация на рабочей моде и частоте возникает во входной секции, а выходная служит лишь для пропускания излучения в выходной волновод. При переходе из одной секции в другую излучение рассеивается и на выходе представляет собой комбинацию мод TE9.1, TM9.1, TE9.2, TM9.2 и TE9.3. В отличие от входной секции, продольная структура поля в выходной имеет характер бегущей волны.

2. При увеличенной длине выходной секции резонатора (на 3 мм) секции работают согласованно, частоты колебаний в них совпадают, поля имеют резонансный характер, рассеянные моды практически отсутствуют. Максимальный КПД составляет 6.4% при мощности 0.9 МВт. В счете с максимальным КПД наблюдается автомодуляция.

3. Конкурирующая генерация на частоте 56.75 ГГц (видимо, мода TE6.1 входной секции) появляется на выходе из резонатора в виде рассеянной моды TE6.1 только в условиях срыва генерации рабочей моды TE9.1-TE9.3 на нижней границе диапазона резонансных магнитных полей.

Таким образом, в эксперименте может проявиться несогласованность работы секций резонатора при возбуждении расчетной комбинации мод, а также генерация паразитных мод, но компьютерное моделирование показало пути устранения этих недостатков. Риск их возникновения, очевидно, повышается при плохом качестве (азимутальная неоднородность, повышенный разброс) электронного пучка, которому следует уделить повышенное внимание.

3. ПОДГОТОВКА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Расчет формирования электронного пучка был проведен в рамках моноскоростной модели, при которой не учитываются шероховатости эмиттера и тепловые скорости электронов, эмитированных нагретым термокатодом. При энергии электронов 280 кэВ, диаметре пучка 10 мм, величине магнитного поля 1,40 Тл и токе 50 А расчетный питч-фактор составлял 1.34 при разбросе электронов по поперечным скоростям 7.8%.

При подготовке к экспериментальным исследованиям был сформирован пучок с близкими к расчету параметрами, качество которого было проверено с помощью магнитного анализатора релятивистских винтовых электронных пучков [3]. В создаваемой анализатором магнитной пробке электроны с наибольшей величиной поперечной компоненты скорости адиабатически отражались и не попадали на измерительный коллекторный электрод. Полученная при изменении магнитного поля в пробке кривая отсечки давала возможность вычислить экспериментальные значения питч-фактора и разброса поперечных скоростей в исследуемом электронном пучке. В данном случае (рис. 5, применяя методику расчета [3]) при токе 11 А питч-фактор равнялся 1,3, а разброс – 30%.

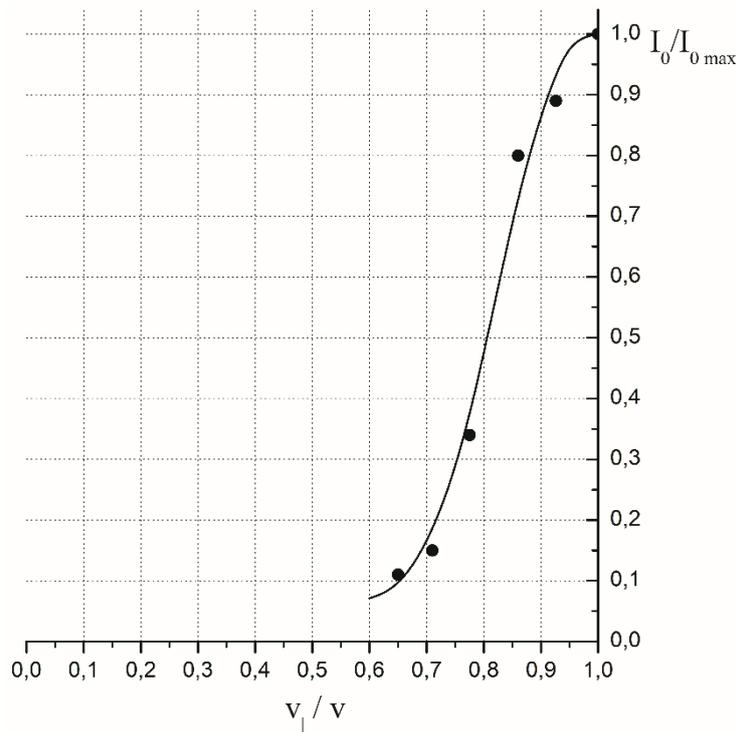


Рис.5. Кривая отсечки, полученная с помощью магнитного анализатора. По оси ординат отложено отношение тока на коллекторный электрод к максимальному току, измеряемому при отсутствии магнитного поля анализатора. По оси абсцисс отложено отношение осцилляторной скорости к полной для тех граничных электронов, которые при соответствующем соотношении магнитных полей еще преодолевают магнитную пробку и достигают коллектора.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 20-02-00274, 20-08-00308.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павельев В.Г., Цимринг Ш.Е. Открытый резонатор. А. с. 661664. Опубл. в Б.И. 1979. №17. С.240.
2. Малыгин С.А. Мощный гиротрон на 3-й гармонике циклотронной частоты. //Радиотехника и электроника. 1986. Вып.2. С.334—336.
3. Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кулагин И.С., Шевченко А.С. Исследование магнитного анализатора релятивистских винтовых электронных пучков // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т.49, №2. С. 134—140.