

УДК 621.385.69.01

## ВЛИЯНИЕ НЕСООСНОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА И РЕЗОНАТОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИРОТРОНА

*Н. А. Завольский, В. Е. Запелов, М. А. Моисеев, А. С. Седов*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

В работе рассматриваются некоторые эффекты, связанные с несовпадением осей электронного пучка и резонатора в гиротронах. Данные эффекты исследуются на примере трёх гиротронов с различными параметрами электронного пучка и выходными характеристиками. Проводится сопоставление экспериментальных данных и результатов компьютерных вычислений на основе многомодовой нестационарной модели электронно-волнового взаимодействия в резонаторе гиротрона.

### ВВЕДЕНИЕ

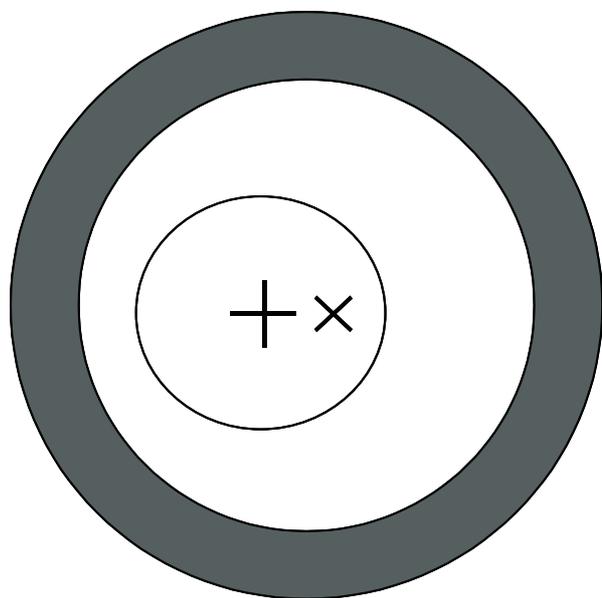


Рис. 1. Схематическое изображение несоосности пучка и резонатора: крест — ось резонатора, прямой крест — ось пучка

Ряд причин, таких, как технологические погрешности при изготовлении гиротрона или неточная юстировка магнитного поля соленоида, могут привести к образованию так называемой несоосности, т. е. ситуации, когда ось ведущих центров орбит электронного пучка не совпадает с осью резонатора (см. рис. 1 и [1]). В этом случае возможно возникновение явлений, связанных с нарушением аксиальной симметрии системы резонатор—пучок. С увеличением частоты работы прибора и, соответственно, укорочением длины волны эта проблема становится всё более острой и практически неизбежной. Ранее в литературе в основном обсуждались проблемы, связанные с уменьшением связи между рабочей модой и пучком, что приводит к снижению коэффициента полезного действия (КПД) прибора [2, 3]. Однако представляет интерес также изучение явлений, обусловленных увеличением связи пучка и некоторых паразитных мод. При этом возможна реализация режима с двухмодовой генерацией.

Частным случаем такого режима является генерация мод с противоположным вращением и сравнимыми амплитудами на одной частоте, т. е. образование стоячей моды.

В данной работе рассматриваются эффекты, связанные с несоосностью электронного пучка для трёх гиротронов с различными параметрами, работающих в непрерывном режиме. При этом можно попытаться проанализировать, какие конкретные эффекты, обусловленные несоосностью, свойственны гиротрону с определёнными параметрами. Все эти гиротроны имеют простую электродинамическую систему в виде регулярного резонатора круглого сечения с входным закритическим сужением и выходным расширением.

Для численного моделирования использовалась программа, основанная на многомодовой нестационарной модели электронно-волнового взаимодействия в гиротроне с самосогласованной

Таблица 1

	Мощность 1 МВт, рабочая частота 170 ГГц	Мощность 3 кВт, рабочая частота 300 ГГц	Мощность 200 Вт, рабочая частота 258 ГГц
Рабочая мода	TE <sub>25,10</sub>	TE <sub>22,8</sub>	TE <sub>-2,3</sub>
Номер гармоники	1	1	2
Ускоряющее напряжение, кВ	80	15	14
Ток пучка, А	35	1	0,4
Радиус резонатора, мм	17,785	8,39	1,84
Радиус пучка, мм	7,4	3,71	0,981
Питч-фактор	1,2	1,0	1,3
Разброс поперечных скоростей	0,3	0,3	0,3

нефиксированной структурой высокочастотного (ВЧ) поля [4, 5], обобщённая на случай несоосности пучка и резонатора. Параметры электронного пучка, используемые при вычислениях, соответствовали характерным экспериментальным значениям, а также результатам электронно-оптических измерений и расчётов. Пучок в рассматриваемой модели предполагался бесконечно тонким и симметричным относительно собственной оси, плотность тока пучка считалась равномерно распределённой по азимуту.

Основные параметры рассматриваемых гиротронов приведены в табл. 1. При численном моделировании предполагалось, что параметры электронного пучка не зависят от величины его несоосности с резонатором.

Средний радиус пучка в резонаторе  $R_0$  обычно выбирается таким, чтобы связь электронного пучка с рабочей модой была максимальна, и в то же время его связь с паразитными модами была ослаблена. Указанная связь для случая соосного пучка определяется величиной структурного фактора

$$G_{mp} = \frac{J_{m-n}^2(\nu_{mp}R_0/R_p)}{J_m^2(\nu_{mp})(\nu_{mp}^2 - m^2)}, \quad (1)$$

где  $n$  — номер рабочей гармоники циклотронной частоты,  $J_m(x)$  — функция Бесселя,  $\nu_{mp}$  — корень уравнения  $J'_m(\nu_{mp}) = 0$ ,  $R_0$  — радиальные координаты центров электронных орбит,  $R_p$  — радиус цилиндрической части резонатора.

Представляется необходимым провести оценку допустимого значения несоосности, при котором её негативное влияние ещё приемлемо, и исследовать явления, возникающие при превышении этого значения.

## 1. ГИРОТРОН С ЧАСТОТОЙ ВЫХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 170 ГГц ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Первый рассматриваемый прибор — гиротрон с частотой выходного излучения 170 ГГц, работающий в непрерывном режиме на первой гармонике гирочастоты с мегаваттным уровнем мощности, применяемый для электронно-циклотронного нагрева плазмы в международном токамаке ITER [6, 7]. Для численного моделирования был выбран один из вариантов прибора, который был разработан в ИПФ РАН и НПП ГИКОМ и в настоящее время проходит испытания в Российском научном центре «Курчатовский институт» [8]. При численном моделировании рассматривалось нестационарное четырёхволновое взаимодействие следующих мод: рабочей моды

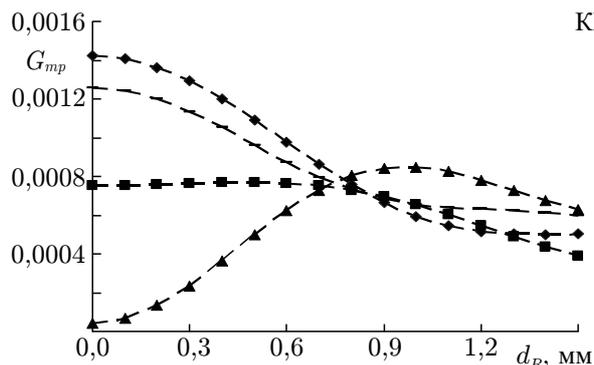


Рис. 2. Структурные факторы рабочей моды  $TE_{25,10}$  ( $\blacklozenge$ ), основной паразитной моды  $TE_{22,11}$  ( $\blacktriangle$ ) и мод  $TE_{-25,10}$  ( $\blacksquare$ ) и  $TE_{-22,11}$  (—) с противоположным направлением вращения

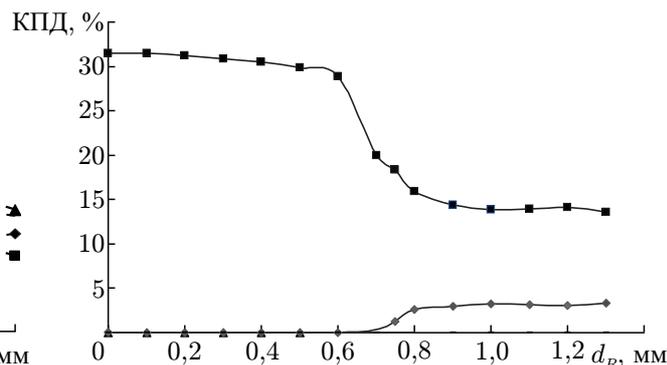


Рис. 3. Расчётный частичный КПД для мод  $TE_{25,10}$  ( $\blacksquare$ ) и  $TE_{22,11}$  ( $\blacklozenge$ ) в зависимости от величины несоосности для гиротрона с частотой выходного излучения 170 ГГц, ускоряющим напряжением  $U = 80$  кВ, током пучка  $I = 35$  А и магнитным полем в центре резонатора  $B = 6,8$  Тл, работающего на первой гирогармонике

$TE_{25,10}$ , наиболее близкой к ней паразитной моды  $TE_{22,11}$ , а также мод  $TE_{-25,10}$  и  $TE_{-22,11}$  с противоположным направлением вращения. Зависимости структурных факторов указанных мод от величины несоосности пучка  $d_R$  приведены на рис. 2.

На рис. 3 приведены зависимости частичных КПД перечисленных четырёх мод в установившемся состоянии от величины несоосности  $d_R$  пучка. Начальные амплитуды всех мод предполагались близкими к стационарной амплитуде рабочей моды. Как видно из рисунка, при увеличении несоосности до 0,6 мм, т. е. до  $1/3$  длины волны, рабочая мода подавляет остальные моды и генерация является одномодовой, но КПД снижается почти на 5 % по сравнению с его максимальным значением. При дальнейшем увеличении несоосности общий КПД достаточно резко падает и в генерацию вовлекаются две моды ( $TE_{25,10}$  и  $TE_{22,11}$ ). Для мод с противоположным вращением КПД пренебрежимо малы, и при испытаниях гиротрона их генерация не наблюдалась [8].

## 2. ГИРОТРОН С ВЫХОДНОЙ ЧАСТОТОЙ 300 ГГц, РАБОТАЮЩИЙ НА ПЕРВОЙ ЦИКЛОТРОННОЙ ГАРМОНИКЕ

Второй из рассматриваемых гиротронов — работающий в непрерывном режиме на первой циклотронной гармонике гиротрон с частотой выходного излучения 300 ГГц — был создан в ИПФ РАН и НПП ГИКОМ для Центра исследований излучения дальнего инфракрасного диапазона университета г. Фукуи (Япония) [9], где он применялся в экспериментальном комплексе по изучению новых материалов, а также в биологических и медицинских приложениях. Расчётная мощность излучения этого гиротрона при ускоряющем напряжении 15 кВ, токе электронного пучка до 1 А и питч-факторе 1,2 была равна 3,5 кВт. Однако экспериментальные исследования показали, что максимальный уровень мощности лежит в пределах  $1,6 \div 2,3$  кВт [9, 10]. Ограничение мощности наступало при возникновении двухчастотного режима генерации с близкими частотами. Одной из наиболее вероятных причин такого несоответствия могла быть несоосность электронного пучка и резонатора.

На первом этапе исследований было проведено компьютерное моделирование с использованием одномодового приближения. Оно показало, что наблюдаемое в эксперименте снижение теоретического КПД в  $1,5 \div 2$  раза соответствует величине несоосности пучка около  $0,4 \div 0,5$  мм (см. рис. 4). Следующим этапом было моделирование с учётом всех мод, которые могут возбуждаться

Рис. 4. Зависимости КПД для рабочей моды от магнитного поля для различных значений несоосности пучка  $d_R$  в гиротроне с частотой выходного излучения 300 ГГц: 1 —  $d_R = 0,1$  мм, 2 —  $d_R = 0,2$  мм, 3 —  $d_R = 0,3$  мм, 4 —  $d_R = 0,4$  мм, 5 —  $d_R = 0,5$  мм

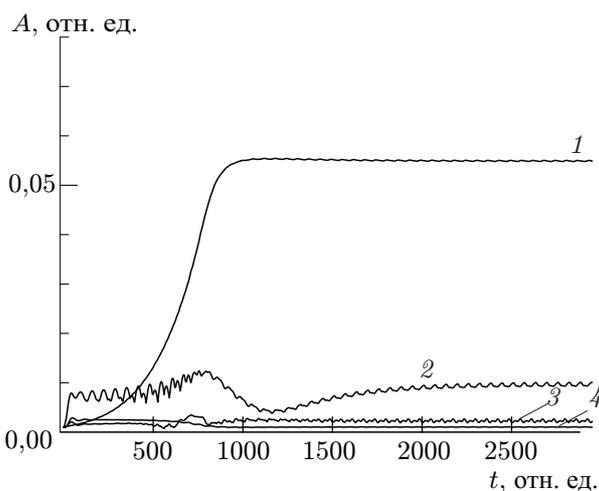
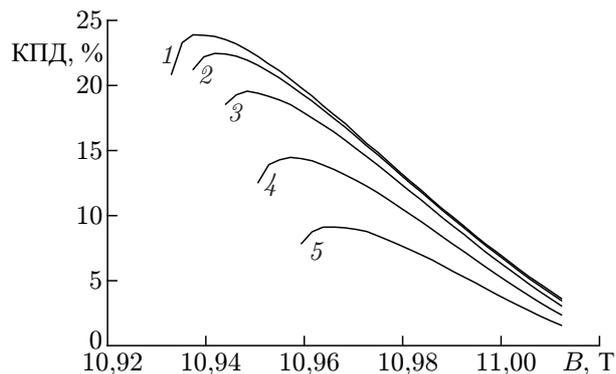


Рис. 5. Нестационарное взаимодействие мод в гиротроне с частотой выходного излучения 300 ГГц при несоосности пучка 0,5 мм. По оси абсцисс отложены условные единицы времени, одна условная единица соответствует 25 нс. По оси ординат отложены амплитуды волн в относительных единицах: 1 — для моды  $TE_{-22,8}$ , 2 — для  $TE_{22,8}$ , 3 — для  $TE_{-19,9}$ , 4 — для  $TE_{19,9}$ ;  $U = 15$  кВ,  $I = 1$  А,  $g = 1,2$ ,  $B = 10,9638$  Тл

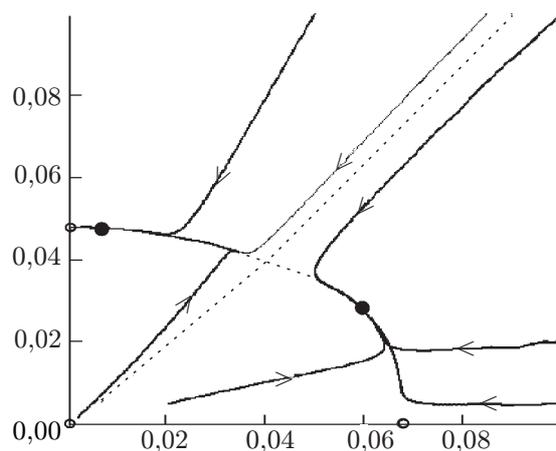


Рис. 6. Фазовая плоскость, поясняющая эффект гистерезиса при несоосности электронного пучка 0,5 мм. По осям отложены амплитуды мод  $TE_{22,8}$  (ось абсцисс) и  $TE_{-22,8}$  (ось ординат) в относительных единицах

ся в зоне генерации. Временные зависимости амплитуд данных мод для величины несоосности 0,5 мм приведены на рис. 5. Так же, как и в рассмотренном ранее гиротроне с частотой выходного излучения 170 ГГц и мощностью 1 МВт, наряду с рабочей модой возбуждается паразитная мода, обладающая высоким КПД. Для мод с противоположным направлением вращения КПД незначительны. Суммарная выходная мощность всех генерируемых мод соответствует экспериментальным данным и составляет 1,7 кВт. Также из расчётов следует возможность двухчастотной генерации, что согласуется с результатами эксперимента. Стоит отметить, что при численном моделировании начиная с некоторой величины несоосности наблюдался эффект гистерезиса, т. е. на фазовой плоскости амплитуд  $TE_{22,8}$  и  $TE_{-22,8}$  имелись два устойчивых состояния равновесия с приблизительно равными суммарными мощностями излучения (см. рис. 6).

### 3. ГИРОТРОН С ЧАСТОТОЙ ВЫХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 258 ГГц И МОЩНОСТЬЮ 200 Вт, РАБОТАЮЩИЙ В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ НА ВТОРОЙ ЦИКЛОТРОННОЙ ГАРМОНИКЕ

В работах [11–13] рассматривались вопросы проектирования и оптимизации высокостабильного гиротрона с частотой выходного излучения 258 ГГц, работающего в непрерывном режиме на второй гармонике циклотронной частоты. Данный прибор в настоящее время является частью комплекса динамической ядерной поляризации для решения задач магниторезонансной спектроскопии в Институте физической биохимии им. И. В. Гете, г. Франкфурт-на-Майне (Германия). В ходе экспериментов [14] был достигнут заявленный уровень выходных параметров на рабочей моде, продемонстрирована их высокая стабильность, а также были проведены наблюдения некоторых паразитных мод.

Однако при этом были отмечены два существенных несоответствия между экспериментальными данными и результатами первоначально проводившегося численного моделирования, а именно:

1) рабочая мода  $TE_{2,3}$  (а также паразитная мода  $TE_{4,2}$ ) на выходе из окна гиротрона имела стоячую в азимутальном направлении структуру, т. е. являлась суперпозицией волн  $TE_{2,3}$  и  $TE_{-2,3}$  с различным направлением вращения и соразмерными амплитудами;

2) мода  $TE_{0,3}$ , которая начинает генерироваться при увеличении ведущего магнитного поля на 2 %, имела достаточно большую мощность 100÷150 Вт, хотя теоретически стартовые условия для неё не были соблюдены, т. к. при расчётных параметрах её стартовый ток превышал рабочий ток приблизительно в 7 раз.

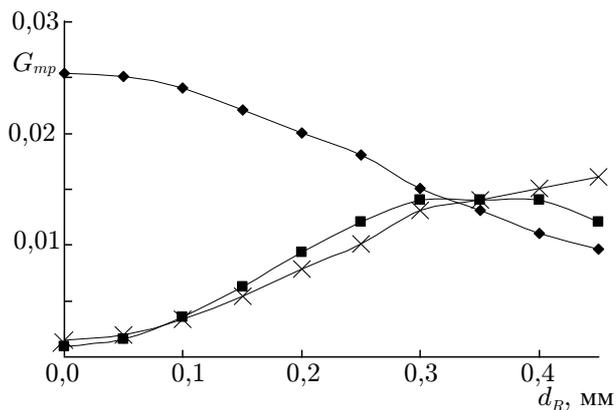


Рис. 7. Зависимости факторов  $G_{mp}$  для мод  $TE_{2,3}$  (■),  $TE_{-2,3}$  (◆) и  $TE_{0,3}$  (×) от величины несоосности электронного пучка и резонатора для гиротрона с частотой выходного излучения 258 ГГц, работающего на второй гармонике циклотронной частоты

Данные эффекты можно объяснить различными отклонениями параметров электронного пучка от теоретических значений, в частности его несоосностью. На рис. 7 для мод  $TE_{2,3}$ ,  $TE_{-2,3}$  и  $TE_{0,3}$  приведены зависимости так называемых факторов  $G_{mp}$ , которые определяют связь между модой и пучком, от величины несоосности электронного пучка. Значения  $d_R$  больше 0,5 мм не рассматривались, т. к. такой пучок с учётом его расплывания и паразитной эмиссии вне эмитирующего пояaska катода задевал бы стенку электродинамической системы. Как видно из рис. 7, при несоосности порядка 0,3÷0,4 мм может возникнуть как совместная генерация мод  $TE_{2,3}$  и  $TE_{-2,3}$ , так и генерация симметричной моды  $TE_{0,3}$  с сопоставимым уровнем мощности. Численное моделирование подтвердило данную гипотезу.

На рис. 8 приведены результаты моделирования взаимодействия мод  $TE_{2,3}$  и  $TE_{-2,3}$  — парциальные КПД данных мод в установившемся состоянии, а также общий выходной КПД в зависимости от величины несоосности. На рис. 9 приведён КПД для моды  $TE_{0,3}$  в зависимости от величины несоосности. Как видно, для величин несоосности 0,3÷0,4 мм не только устанавливается двухмодовая генерация мод  $TE_{2,3}$  и  $TE_{-2,3}$ , но и (при другой настройке магнитного поля) генерируется мода  $TE_{0,3}$ , причём выходные мощности в этих двух случаях приблизительно равны и хорошо согласуются с экспериментальными данными. Технологические погрешности и раз-

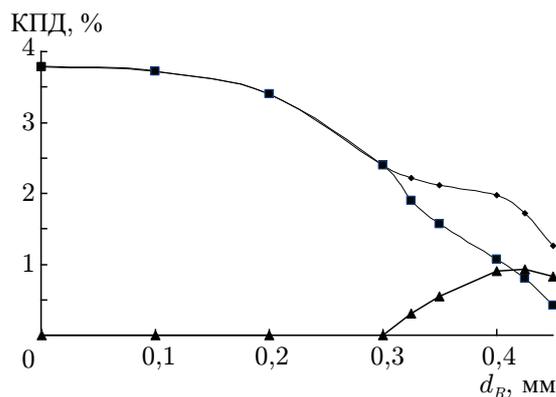


Рис. 8. Расчетный парциальный КПД для мод  $TE_{-2,3}$  (■) и  $TE_{2,3}$  (▲) и суммарный КПД (●) для гиротрона с частотой выходного излучения 258 ГГц, работающего на второй гармонике циклотронной частоты

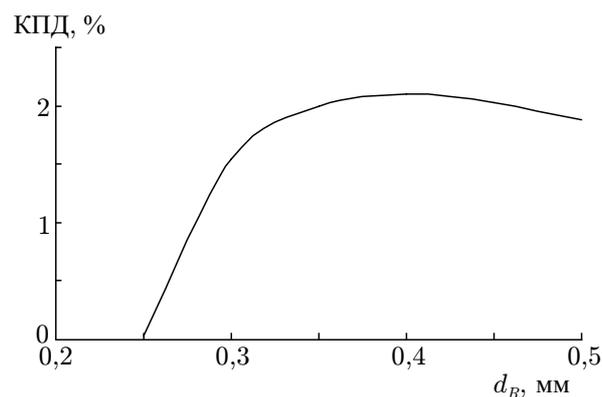


Рис. 9. Расчетный КПД для моды  $TE_{0,3}$  для гиротрона с частотой выходного излучения 258 ГГц, работающего на второй циклотронной гармонике

юстировка магнитного поля и резонатора для величин несоосности  $0,3 \div 0,4$  мм представляются чрезмерно большими, однако проконтролировать деформации внутри лампы после термических процессов при её изготовлении не представляется возможным без её повреждения.

Таким образом, результаты эксперимента можно объяснить наличием несоосности электронного пучка и резонатора. Аналитические и численные исследования различных моделей гиротронов [15] и других аксиально симметричных автоколебательных систем, в частности кольцевых линий с распределёнными нелинейными параметрами [16], показывают возможность возбуждения только вращающихся мод. Необходимо отметить, что согласно [17] к эффекту двухмодовой генерации мод  $TE_{2,3}$  и  $TE_{-2,3}$  может привести ничтожная деформация стенки резонатора с амплитудой 4-й пространственной гармоники порядка 1 мкм. Наиболее вероятным представляется совокупное влияние указанных выше факторов.

## ВЫВОДЫ

На примере трёх работающих в непрерывном режиме гиротронов исследованы эффекты, связанные с несоосностью электронного пучка и резонатора. Показано, что для гиротронов, работающих на сравнительно высоких модах, основным эффектом является переход в режим двухмодовой генерации рабочей и одной из паразитных мод. Для гиротронов, работающих на относительно низких модах, несоосность приводит к образованию стоячей в азимутальном направлении волны. В обоих случаях можно также наблюдать снижение КПД рабочей моды и эффект гистерезиса. Перечисленные эффекты наблюдались со всей очевидностью при величине несоосности пучка начиная с  $1/4 \div 1/3$  длины волны. Наличие несоосности электронного пучка может объяснить некоторые расхождения между экспериментальными данными и результатами численного моделирования, проведённого без учёта этого фактора. Следует отметить, что в данной работе не рассматривались эффекты, связанные с азимутальной неоднородностью и несимметричностью эмиссии электронного пучка [18]. Учёт этих эффектов может более точно объяснить результаты экспериментов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нусинович Г.С. // Радиотехника и электроника. 1974. Т. 19, № 8. С.1788.

2. Idehara T., Shibutani K., Nojima H., et al. // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*. 1998. V. 1, No. 19 P. 1303.
3. Dumbrajs O. // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*. 1994. V. 15, No. 7. P. 1255.
4. Ginzburg N. S., Nusinovich G. S., Zavolsky N. A. // *Int. J. Electronics*. 1986. V. 61, No. 6. P. 881.
5. Moiseev M. A., Nemirovskaya L. L., Zapevalov V. E., Zavolsky N. A. // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*. 1997. V. 18, No. 11. P. 2117.
6. Мясников В. Е., Агапова М. В., Ильин В. Н. и др. // *Радиотехника*. 2000. № 2. С. 67.
7. Litvak A. G., Denisov G. G., Myasnikov V. E., et al. // *The 35th Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2010, 4–10 Sept, Roma, Italy: Conference Digest*. P. Tu-E11.
8. Zapevalov V. E., Denisov G. G., Flyagin V. A., et al. // *Fusion Engineering and Design*. 2000. V. 53, No. 1–4. P. 377.
9. Запевалов В. Е., Лыгин В. К., Малыгин О. В. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2007. Т. 50, № 6. С. 461.
10. Saito T., Nakano T., Hoshizuki H., et al. // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*. 2007. V. 28. P. 1063.
11. Завольский Н. А., Запевалов В. Е., Малыгин О. В. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2009. Т. 52, № 5–6. С. 541.
12. Завольский Н. А., Запевалов В. Е., Малыгин О. В. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2009. Т. 52, № 12. С. 972.
13. Запевалов В. Е., Корнишин С. Ю., Котов А. В. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2010. Т. 53, № 4. С. 251.
14. Венедиктов Н. П., Дубров В. В., Запевалов В. Е. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2010. Т. 53, No. 4. С. 260.
15. Nusinovich G. S. *Introduction to the Physics of Gyrotrons*. Baltimore, London: The Johns Hopkins University Press, 2004.
16. Рабинович М. И. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1965. Т. 8. С. 794.
17. Найфе А. *Введение в методы возмущений*. М.: Мир, 1984. С. 447.
18. Nusinovich G. S., Vlasov A. N., Botton M., et al. // *Phys. Plasmas*. 2001. V. 8, No. 7. P. 3473.

Поступила в редакцию 18 января 2011 г.; принята в печать 28 июня 2011 г.

## INFLUENCE OF THE AXIAL MISALIGNMENT OF THE ELECTRON BEAM AND THE CAVITY ON THE GYROTRON PARAMETERS

*N. A. Zavol'skiy, V. E. Zapevalov, M. A. Moiseev, and A. S. Sedov*

We consider some effects connected with the axial misalignment of the electron beam and the cavity in gyrotrons. These effects are studied by the example of three gyrotrons with different parameters of the electron beam and output characteristics. The experimental data and the results of computer calculations are correlated on the basis of a multi-mode nonstationary model of the electron-wave interaction in the gyrotron cavity.