



**ВЛИЯНИЕ АЗИМУТАЛЬНОЙ НЕСИММЕТРИИ
ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ГИРОТРОНОВ
СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА***

*М. Ю. Глявин^{1,2}, Н. А. Завольский¹, В. Е. Запелов¹,
В. Ю. Заславский^{1,2}, К. А. Лецева², Р. М. Розенталь¹, А. С. Седов¹*

¹Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

²ННГУ им. Лобачевского, Нижний Новгород

Применительно к реализованному в ИПФ РАН непрерывному гиротрону с рабочей частотой 263 ГГц киловаттного уровня мощности различными методами выполнено моделирование взаимодействия электронного потока с высокочастотным полем резонатора. С использованием системы уравнений для медленно меняющихся амплитуды и фазы поля, а также трехмерного метода крупных частиц (программные коды CST и KARAT) исследовано влияние нарушения азимутальной симметрии инжектируемого электронного пучка на выходные характеристики гиротрона. Соответствие результатов, полученных различными методами, позволяет утверждать о корректности использования трехмерных кодов для анализа приборов с нарушениями азимутальной симметрии электродинамической системы и электронного потока в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Показано, что при практически возможных значениях несимметрии относительное снижение КПД может достигать 40%.

Ключевые слова: Субмиллиметровое излучение, гиротрон, азимутальная неоднородность, численное моделирование, эффективность.

Освоение гиротронами субтерагерцового и терагерцового диапазона вплотную приближает значения рабочих длин волн к пределам технологической точности сборки, точности юстировки прибора в магнитном поле и масштабам неоднородностей эмитирующей поверхности катода. Учитывая, что к настоящему моменту уже реализованы гиротроны на длине волны 0.5 мм с уровнем мощности сотни киловатт [1] и на длине волны 0.3 мм с киловаттной мощностью выходного излучения [2], возрастает актуальность учета указанных факторов для обеспечения реализуемости и устойчивости расчетных режимов генерации.

*Статья написана по материалам доклада, прочитанного на XVI Международной зимней школе-семинаре по радиофизике и электронике СВЧ. Саратов, Россия, 2–7 февраля 2015

Ряд причин, таких как технологические погрешности при изготовлении гиротрона или неточная юстировка магнитного поля соленоида, могут привести к образованию так называемой несоосности, то есть ситуации, когда ось ведущих центров орбит электронного пучка не совпадает с осью резонатора [3]. Эффекты, возникающие в данной ситуации, связаны с нарушением аксиальной симметрии системы резонатор–пучок. С увеличением частоты работы прибора и, соответственно, укорочением длины волны эта проблема значительно обостряется. К примеру, интерпретация данных экспериментов с гиротроном диапазона 260 ГГц, возбуждаемым винтовым электронным пучком с энергией 15–20 кэВ, током 0.5 А и питч-фактором¹ 1.2–1.4 [4], позволяла сделать вывод, что в системе имела место несоосность электронного пучка и резонатора, создающая условия для генерации паразитных мод [5]. Следует отметить значительное число работ в последнее время, анализирующих эффекты, связанные с азимутальной несимметрией электронного потока и пространства взаимодействия (см., например, [6–9]). Большинство этих работ используют традиционный для теории гиротронов подход, основанный на решении самосогласованной системы уравнений [10], включающей уравнение движения электронов и уравнения для медленно (в масштабах времени пролета) меняющихся амплитуды и фазы высокочастотного поля. Представляется актуальным исследовать возможность прямого трехмерного моделирования гиротрона, что позволит одновременно учесть различные факторы и неоднородности как электронного потока, так и электродинамической системы, предварительно протестировав достоверность тех или иных методов расчета.

В данной работе исследование влияния нарушений аксиальной симметрии пучка осуществлено применительно к реализованному в ИПФ РАН для задач спектроскопии гиротрону с рабочей частотой 263 ГГц [11]. Данный гиротрон построен на основе криомагнита JMTD10T100 (производство JASTEC Ltd. [12]), не требующего заливки жидким гелием и обеспечивающего интенсивность магнитного поля до 10 Тл. Расчетные номинальные параметры электронного пучка гиротрона – ток до 0.4 А, энергия 15 кэВ, питч-фактор 1.3. В качестве рабочего типа колебаний используется мода TE_{5,3} на первой гармонике гирочастоты. Выходное излучение преобразуется встроенным квазиоптическим преобразователем в гауссов пучок. Преобразователь с расчетной величиной потерь не более 7% построен по традиционной схеме (см., например, [13]) включающей в себя излучатель на срезе волновода, параболическое зеркало и три фазовых корректора. При выводе микроволнового излучения из вакуумного объема лампы еще порядка 7% мощности теряется за счет поглощения в диэлектрическом окне из нитрида бора. Указанное значение потерь подтверждено экспериментально панорамными измерениями.

Моделирование режимов генерации гиротрона выполнялось как в рамках традиционного подхода, базирующегося на усредненных нестационарных уравнениях [10], так и с использованием трехмерных PIC (particle-in-cells) кодов CST Studio Suite (CST) [14] и KARAT [15]. Таким образом, кроме прикладной цели исследования влияния данного эффекта на выходные характеристики работы гиротрона, так же ставилась задача сравнить эффективность и правильность расчета различными методами при рассмотрении такой достаточно сложной системы, как гиротрон со смещенным пучком.

Программный код CST использует аппроксимации для идеальных граничных условий применительно к достаточно общему методу конечных интегралов. Для

¹Питч-фактор – отношение вращательной скорости электронов к скорости их поступательного движения.

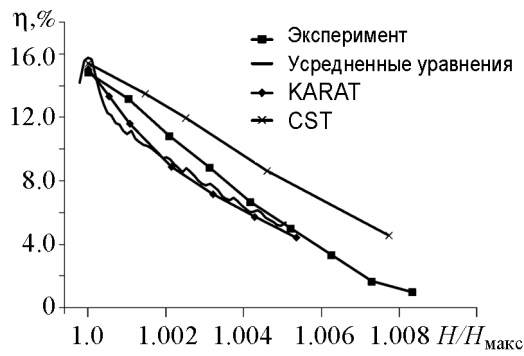


Рис. 1. Зависимость полного КПД гиротрона от магнитного поля (нормированного на значение в максимуме КПД)

разностную схему с перешагиванием на прямоугольных сетках со сдвигом. Конкретная реализация схемы, примененная в коде, обладает свойством точного описания граничных условий на поверхностях расчетной области [15,17]. Код KARAT успешно используется для широкого круга задач вакуумной электроники и физики плазмы. Ранее с его помощью было выполнено моделирование стационарных и нестационарных режимов генерации в мощном релятивистском гиротроне диапазона 9 ГГц, продемонстрировавшее соответствие результатов экспериментальным данным [18, 19].

Результаты моделирования стационарных режимов генерации исследуемого гиротрона в рамках усредненных уравнений и описанными выше PIC-кодами в случае несмещенного пучка с оптимальным радиусом центров электронных орбит представлены на рис. 1. Следует отметить полное совпадение найденных значений максимального КПД генерации для всех методов расчета и экспериментальных данных. Определенные различия наблюдаются в значениях КПД для неоптимальных по КПД режимов генерации, при отстройке магнитного поля от оптимального значения. Выяснение этих причин требует дополнительного исследования.

Рассмотрим возможные механизмы влияния несоосности электронного пучка на работу гиротрона. В рамках одномодового приближения основной эффект связан с понижением эффективности электронно-волнового взаимодействия за счет различных (в том числе меньших оптимального) значений амплитуды поля волны для различных азимутальных фракций смещенного пучка, что отражается на изменении фактора связи между волной и пучком. Для симметричного электронного пучка фактор связи может быть рассчитан по известной [20,21] формуле

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

где v_{mp} – корень уравнения $J'_m(v_{mp}) = 0$, соответствующий рассматриваемой $TE_{m,p}$ моде; $J_m(v_{mp})$ – функция Бесселя; R_p – радиус цилиндрической части резонатора; R_0 – радиальная координата ведущего центра электронных орбит.

В первом приближении для оценки снижения КПД можно использовать простую модель, введя эффективный фактор связи, проведя усреднение выражения (1) по угловой координате. Радиус пучка для каждой азимутальной фракции можно выразить следующим образом: $R_0 = R_{00} + d \cos(\psi)$, где R_{00} – радиус несмещенного пучка, d – расстояние от оси пучка до оси резонатора (величина смещения).

повышения точности счета применяется тетраэдральная сетка. Следует отметить, что с помощью программы CST ранее была продемонстрирована возможность достоверного моделирования нелинейной динамики экспериментально реализованного гиротрона с рабочей частотой 1 ТГц при значительной сверхразмерности (отношение и диаметра, и длины резонатора к длине волны примерно равны 10) электродинамической системы [16].

Программный код KARAT для решения уравнений Максвелла использует

В итоге эффективный фактор связи будет иметь вид

$$G_{mp} = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} J_{m-n}^2(v_{mp}(R_{00} + d \cos(\psi))/R_p) d\psi}{J_m^2(v_{mp})(v_{mp}^2 - m^2)}. \quad (2)$$

В практически важных случаях смещение пучка мало, что позволяет разложить функцию Бесселя под интегралом в ряд по величине $v_{mp}d/R_p$. При этом, так как невозмущенный пучок соответствует максимуму функции Бесселя, первым ненулевым членом разложения будет квадратичный

$$J_{m-n}(v_{mp}(R_{00} + d \cos(\psi))/R_p) \cong J_{m-n}(v_{mp}R_{00}/R_p) + \frac{\alpha}{2} \cos^2(\psi),$$

$$\alpha = (1/4)(J_{m-n-2}(v_{mp}R_{00}/R_p) - 2J_{m-n}(v_{mp}R_{00}/R_p) + J_{m-n}(v_{mp}R_{00}/R_p))(v_{mp}d/R_p)^2.$$

После интегрирования выражение для эффективного фактора связи примет вид

$$G_{mp} = G_{mp0} \left(1 + \frac{\alpha}{2J_{m-n}^2(v_{mp}R_{00}/R_p)} \right), \quad (3)$$

где G_{mp0} – фактор связи несмещенного пучка.

Для рассматриваемого нами гиротрона с рабочей модой $TE_{5,3}$ несоосность пучка с величиной отклонения $d = 0.3$ мм приведет к уменьшению эффективного фактора связи на 40% по сравнению с несмещенным пучком. Для оценки изменения значения КПД можно воспользоваться результатами работы [20], где представлены зависимости эффективности преобразования вращательной энергии электронов в энергию высокочастотного поля (так называемый поперечный КПД) от безразмерных параметра тока и длины резонатора. Для рассматриваемых нами параметров гиротрона уменьшение параметра тока (в который фактор связи входит линейно) на 40%, приведет к уменьшению поперечного (и, следовательно, полного) КПД приблизительно на 20%.

Полученные оценки хорошо соответствуют результатам численного моделирования, выполненного на основе усредненных уравнений и с использованием РИС-кода KARAT (рис. 2). Отметим, что для учета несоосности пучка и резонатора в укороченные уравнения [21], описывающие электронно-волновое взаимодействие в гиротроне, в уравнение возбуждения резонатора вводится дополнительное усреднение

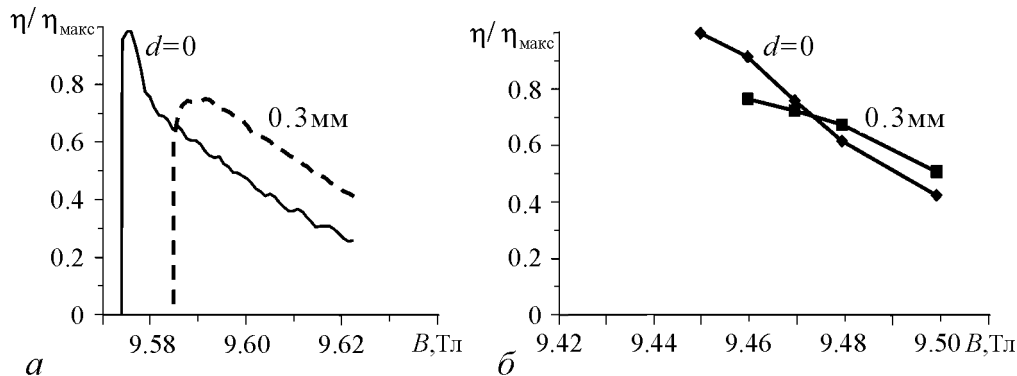


Рис. 2. Зоны генерации гиротрона с несмещенным и смещенным пучком: a – усредненные уравнения, b – метод крупных частиц (код KARAT). КПД нормирован на максимальное значение для несмещенного пучка

по азимутальному углу ψ , а в уравнения движения вводится коэффициент перед амплитудой поля, который характеризует отличие поля для данной фракции от поля для невозмущенного пучка.

Из рис. 2 видно, что относительное снижение КПД при смещении пучка $d = 0.3$ мм (примерно $\lambda/3$) составляет величину 25%. Некоторое различие в значениях резонансного магнитного поля, при котором достигается максимум КПД (в модели на основе усредненных уравнений (рис. 2, а) оно составляет 9.575 Тл, а при расчете методом крупных частиц (рис. 2, б) – 9.45 Тл), объясняется дискретностью сетки второго метода. Как результат, реальный радиус резонатора при моделировании методом крупных частиц отличается от изначально задаваемого на величину в пределах половины шага сетки по поперечной координате. В данном случае это различие составляет примерно 1.3%.

Следует отметить, что проведенный численный анализ был выполнен в предположении симметричного углового распределения питч-фактора и тока пучка относительно оси пучка. Вместе с тем, детальное моделирование электронно-оптической системы гиротрона с близкими параметрами [22] показывает, что смещение оси пучка приводит к значительному нарушению симметрии питч-фактора, отклонения которого от среднего значения могут достигать 15% и объясняются асимметрией магнитного поля на эмиттере, которая затем усиливается адиабатической накачкой [23]. Влияние такого пучка на параметры генерации в гиротроне будет являться предметом последующих исследований.

Наряду с влиянием несоосности значительный интерес представляет учет перекоса электронного пучка относительно оси резонатора. Адекватный учет такого эффекта в рамках усредненных уравнений уже не может быть сведен к вычислению эффективного коэффициента связи, поскольку последний также будет зависеть и от продольной координаты. В этой связи первоначальные оценки были выполнены в рамках метода крупных частиц. Перекос пучка формировался за счет наклона ведущего магнитного поля. Полученный результат демонстрирует, что при величине перекоса в 1 градус относительное снижение эффективности генерации составляет почти 40% (рис. 3).

Таким образом, проведенный численный анализ показывает существенное влияние нарушений азимутальной симметрии винтового электронного пучка на режим генерации субтерагерцового гиротрона, значительное большее, чем было предсказано в [24] для длинноволновых гиротронов, используемых, например, в технологиче-

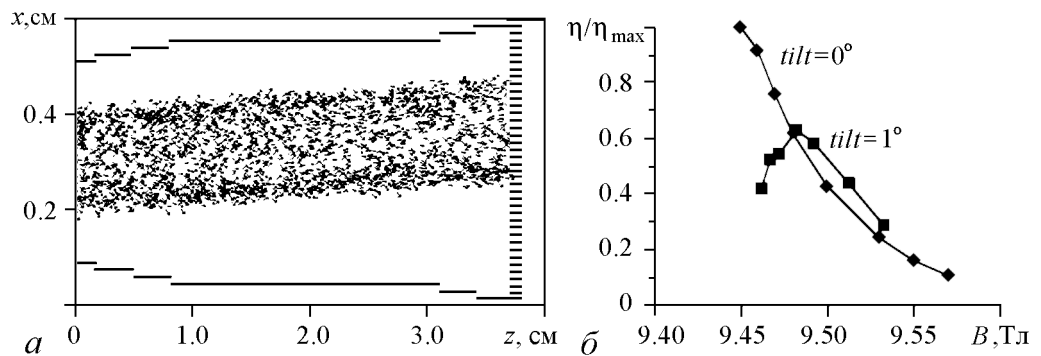


Рис. 3. Трехмерное моделирование перекоса электронного пучка (код KARAT): а – сечение пространства взаимодействия и векторы скорости макрочастиц, б – зоны генерации. КПД нормирован на максимальное значение для несмещенного пучка

ских комплексах микроволновой обработки материалов. Последнее легко объяснить, если учесть, что абсолютные величины погрешностей юстировки и изготовления отдельных узлов примерно одинаковы, а относительные значения растут с укорочением длины волны.

Полученные результаты предполагается использовать при проектировании гиротронов диапазона 500–800 ГГц для выработки требований на точность изготовления и сочленения отдельных узлов. Дальнейшие исследования предполагается сосредоточить в области реализации «сквозного» моделирования, при котором результаты расчетов параметров винтового электронного пучка, сформированного в несимметричной системе, будут использованы в качестве входных данных для программ моделирования электронно-волнового взаимодействия в трехмерном пространстве с нарушениями азимутальной симметрии.

Авторы глубоко признательны В.П.Тараканову за помощь в адаптации кода для расчета субмиллиметровых гиротронов.

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант №14-12-00887.

Библиографический список

1. Глявин М.Ю., Лучинин А.Г., Богдашов А.А., Мануилов В.Н., Морозкин М.В., Кашин Д., Родин Ю.В., Денисов Г.Г., Роджерс Дж., Ромеро-Таламас К.А., Пу Р., Шкварунец А.Г., Нусинович Г.С. Экспериментальное исследование импульсного терагерцового гиротрона с рекордными значениями мощности и эффективности // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8–9. С. 550.
2. Глявин М.Ю., Лучинин А.Г. Терагерцовый гиротрон с импульсным магнитным полем // Известия вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 10–11. С. 831.
3. *Dumbrajs O.* Eccentricity of the electron beam in a gyrotron cavity // *Int. J of Infrared and MM Waves.* 1994. Vol. 15, № 7. P. 1255.
4. Венедиктов Н.П., Дубров В.В., Запелалов В.Е., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Седов А.С., Фикс А.Ш., Цалыхин В.И. Экспериментальное исследование непрерывного высокостабильного гиротрона на второй гармонике для спектроскопии динамически поляризованных ядер // Известия вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 4. С. 260.
5. Завольский Н.А., Запелалов В.Е., Мусеев М.А., Седов А.С. Влияние несоосности электронного пучка и резонатора на характеристики гиротрона // Известия вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 6. С. 444.
6. *Nusinovich G.S., Vlasov A.N., Botton M., Antonsen T.M., Cauffman S.* Effect of the azimuthal inhomogeneity of electron emission on gyrotron operation // *Phys. Plasmas.* 2001. Vol. 8, № 7. 3473.
7. *Nusinovich G.S., Sinitsyn O.V., Antonsen T.M.* Mode switching in a gyrotron with azimuthally corrugated resonator // *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 98. 205101.
8. *Dumbrajs O., Nusinovich G.S.* Effect of electron beam misalignments on the gyrotron efficiency // *Phys. Plasmas.* 2013. Vol. 20. 073105.
9. *Khutoryan E.M., Dumbrajs O., Nusinovich G.S., Idehara T.* Theoretical study of the effect of electron beam misalignment on operation of the gyrotron FU IV A // *IEEE Trans. on Plasma Science.* 2014. Vol. 42, № 6. P. 1586.
10. *Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Zavolsky N.A.* Theory of nonstationary processes in gyrotrons with low-Q resonators // *Int. J. Electron.* 1986. Vol. 61, № 6. P. 881.

11. Glyavin M.Yu., Chirkov A.V., Denisov G.G., Fokin A.P., Kholoptsev V.V., Kuftin A.N., Luchinin A.G., Golubyatnikov G.Yu., Malygin V.I., Morozkin M.V., Manuilov V.N., Proyavin M.D., Sedov A.S., Sokolov E.V., Tai E.M., Tsvetkov A.I., Zapevalov V.E. Experimental tests of 263 GHz gyrotron for spectroscopy applications and diagnostic of various media // *Rev. Sci. Instr.* 2015. 86(5). 054705.
12. www.jastec-inc.com/e_products_cryogen/index.html
13. Чирков А.В., Денисов Г.Г., Куфтин А.Н., Запезалов В.Е., Малыгин В.И., Моисеев М.А., Корнишин С.Ю. Многочастотный гиротрон с высокоэффективным синтезированным волноводным преобразователем // *Письма в ЖТФ.* 2007. Т. 33, № 8. С. 71.
14. <https://www.cst.com/Products/CSTS2>
15. Тараканов В.П. Универсальный электромагнитный код KAPAT // *Математическое моделирование. Проблемы и результаты / Под ред. О.М. Белоцерковского.* М.: Наука, 2003. 477 с.
16. Zaslavsky V.Yu., Ginzburg N.S., Glyavin M.Yu., Zhelezov I.V., Zotova I.V. Three-dimensional particle-in-cell modeling of terahertz gyrotrons with cylindrical and planar configurations of the interaction space // *Phys. Plasmas.* 2013. Vol. 20. 043103.
17. Тараканов В.П. Теоретический и численный анализ нелинейных задач физики плазмы посредством кода KAPAT. Дисс. д.ф.-м.н. М., 2011.
<http://test.vak.ed.gov.ru/common/img/uploaded/files/TarakanovVP.pdf>
18. Зайцев Н.И., Гинзбург Н.С., Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Иляков Е.В., Кулагин И.С., Куфтин А.Н., Лыгин В.К., Моисеев М.А., Новожилова Ю.В., Розенталь Р.М., Цалолыхин В.И. Высокоэффективный релятивистский гиротрон сантиметрового диапазона длин волн с микросекундной длительностью СВЧ импульса // *Письма в ЖТФ.* 2001. Т. 27, № 7. С. 8.
19. Гинзбург Н.С., Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кулагин И.С., Розенталь Р.М. Наблюдение автомодуляционных режимов генерации в релятивистском гиротроне с запаздывающей обратной связью // *Письма в ЖТФ.* 2002. Т. 28, № 9. С. 85.
20. Нусинович Г.С., Эрм Р.Э. КПД МЦР-монотрона с гауссовым продольным распределением ВЧ поля // *Электронная техника. Сер 1. Электроника СВЧ.* 1972. № 8. С. 55.
21. Моисеев М.А., Нусинович Г.С. К теории многомодовой генерации в гиромонотроне // *Известия вузов. Радиофизика.* 1974. Т. 17, № 11. С. 1709.
22. Запезалов В.Е., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Мануилов В.Н., Седов А.С., Цалолыхин В.И. Система формирования электронного пучка для гиротрона с частотой 258 ГГц, предназначенного для экспериментов по динамической поляризации ядер // *Известия вузов. Радиофизика.* 2010. Т. 53, № 4. С. 251.
23. Семенов Е.С., Планкин О.П., Розенталь Р.М. Развитие методов анализа электронно-оптических систем гиротронов с нарушениями азимутальной симметрии // *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 2015. Т.23, №3 (в печати).
24. Malygin A.S., Pagonakis I.G., Piosczyk B., Kern S., Weggen J., Thumm M., Jelonnek J., Avramides K.A., Ives R.L., Marsden D., Collins G. Design and 3-D simulations of a 10-kW/28-GHz gyrotron with a segmented emitter based on controlled porosity-reservoir cathodes // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2013. Vol. 41, № 10. P. 2717.

References

1. Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Bogdashov A.A., Manuilov V.N., Morozkin M.V., Kashin D., Rodin Yu.V., Denisov G.G., Rogers G., Romero-Talamas C.A., Pu R., Shkvarunetz A.G., Nusinovich G.S. Experimental investigation of the pulsed terahertz gyrotron with record-breaking power and efficiency parameters // Radiophysics and Quantum Electronics. 2013. Vol. 56, № 8-9. P. 550.
2. Glyavin M.Yu., Luchinin A.G. A terahertz gyrotron with pulsed magnetic field // Radiophysics and Quantum Electronics. 2007. Vol.50, № 10-11. P.755.
3. Dumbrajs O. Eccentricity of the electron beam in a gyrotron cavity // Int. J. of Infrared and MM Waves. 1994. Vol. 15, № 7. P. 1255.
4. Venediktov N.P., Dubrov V.V., Zapevalov V.E., Kornishin S.Yu., Kotov A.V., Kuftin A.N., Malygin O.V., Sedov A.S., Fiks A.Sh., Tsalolikhin V.I. Experimental study of a continuous-wave high-stability second-harmonic gyrotron for spectroscopy of dynamically polarized nuclei // Radiophysics and Quantum Electronics. 2010. Vol. 53, № 4. P. 237.
5. Zavoł'skiy N.A., Zapevalov V.E., Moiseev M.A., Sedov A.S. Influence of the axial misalignment of the electron beam and the cavity on the gyrotron parameters // Radiophysics and Quantum Electronics. 2011. Vol. 54, № 6. P. 402.
6. Nusinovich G.S., Vlasov A.N., Botton M., Antonsen T.M., Cauffman S. Effect of the azimuthal inhomogeneity of electron emission on gyrotron operation // Phys. Plasmas. 2001. Vol. 8, № 7. 3473
7. Nusinovich G.S., Sinitsyn O.V., Antonsen T.M. Mode switching in a gyrotron with azimuthally corrugated resonator // Phys. Rev. Lett. 2007. Vol. 98. 205101.
8. Dumbrajs O., Nusinovich G.S. Effect of electron beam misalignments on the gyrotron efficiency // Phys. Plasmas. 2013. Vol. 20. 073105.
9. Khutoryan E.M., Dumbrajs O., Nusinovich G.S., Idehara T. Theoretical study of the effect of electron beam misalignment on operation of the gyrotron FU IV A // IEEE Trans. on Plasma Science. 2014. Vol. 42, № 6. 1586.
10. Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Zavolsky N.A. Theory of nonstationary processes in gyrotrons with low-Q resonators // Int. J. Electron. 1986. Vol. 61, № 6. 881.
11. Glyavin M.Yu., Chirkov A.V., Denisov G.G., Fokin A.P., Kholoptsev V.V., Kuftin A.N., Luchinin A.G., Golubyatnikov G.Yu., Malygin V.I., Morozkin M.V., Manuilov V.N., Proyavin M.D., Sedov A.S., Sokolov E.V., Tai E.M., Tsvetkov A.I., Zapevalov V.E. Experimental tests of 263 GHz gyrotron for spectroscopy applications and diagnostic of various media // Rev. Sci. Instr. 2015. 86(5). 054705.
12. www.jastec-inc.com/e_products_cryogen/index.html
13. Chirkov A.V., Denisov G.G., Kuftin A.N., Zapevalov V.E., Malygin V.I., Moiseev M.A., Kornishin S.Yu. Multifrequency gyrotron with high-efficiency synthesized waveguide converter // Technical Physics Letters. 2007. Vol. 33, issue 4. P. 350.
14. <https://www.cst.com/Products/CSTS2>
15. Tarakanov V.P. Universal'nii elektromagnitnii kod KARAT// Matematicheskoye modelirovaniye. Problemy i rezul'taty / Pod red. O.M. Belotserkovskogo. M.: Nauka, 2003. 477 s. (in Russian).
16. Zaslavsky V.Yu., Ginzburg N.S., Glyavin M.Yu., Zheleznov I.V., Zotova I.V. Three-dimensional particle-in-cell modeling of terahertz gyrotrons with cylindrical and

planar configurations of the interaction space // Phys. Plasmas. 2013. Vol. 20. 043103.

17. *Tarakanov V.P.* Teoreticheskiy i chislennyy analiz nelineynykh zadach fiziki plazmy posredstvom koda KARAT. Diss. d.f.-m.n. M., 2011 (in Russian).
<http://test.vak.ed.gov.ru/common/img/uploaded/files/TarakanovVP.pdf>
18. *Zaitsev N.I., Ginzburg N.S., Zavolsky N.A., Zapevalov V.E., Ilyakov E.V., Kulagin I.S., Kuftin A.N., Lygin V.K., Moiseev M.A., Novozhilova Yu.V., Rozental R.M., Tsololikhin V.I.* Highly efficient relativistic SHF gyrotron with a microsecond pulse width // Technical Physics Letters. 2001. Vol.27, № 4. P.266.
19. *Ginzburg N.S., Zaitsev N.I., Ilyakov E.V., Kulagin I.S., Rosenthal R.M.* Self-modulated generation observed in a delayed feedback relativistic gyrotron // Tech. Phys. Lett. 2002. Vol.28, № 5. P.395.
20. *Nusinovich G.S., Erm R.E.* // Elektronnaya Tekhnica. Ser.1. Elektronika SVCh. 1972. Vol. 8. S.55 (in Russian).
21. *Moiseev M.A., Nusinovich G.S.* Concerning the theory of multimode oscillation in a gyromonotron // Radiophysics and Quantum Electronics. 1974. Vol.17, № 11. P.1305.
22. *Zapevalov V.E., Kornishin S.Yu., Kotov A.V., Kuftin A.N., Malygin O.V., Manuilov V.N., Sedov A.S., Tsololikhin V.I.* System for the formation of an electron beam in a 258 GHz gyrotron designed for experiments on dynamic polarization of nuclei // Radiophysics and Quantum Electronics. 2010. Vol. 53, № 4. P. 229.
23. *Semenov E.S., Plankin O.P., Rozental R.M.* Razvitiye metodov analiza elektronno-opticheskikh sistem girotronov s narusheniyami azimutal'noy simmetrii // Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika. 2015. T. 23, № 3 (in Russian, in print).
24. *Malygin A.S., Pagonakis I.G., Piosczyk B., Kern S., Weggen J., Thumm M., Jelonnek J., Avramides K.A., Ives R.L., Marsden D., Collins G.* Design and 3-D simulations of a 10-kW/28-GHz gyrotron with a segmented emitter based on controlled porosity-reservoir cathodes // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. Vol. 41, №10. P. 2717.

Поступила в редакцию 20.04.2015

THE INFLUENCE OF THE AZIMUTHAL INHOMOGENEITY OF ELECTRON BEAM-MICROWAVE INTERACTION ON THE OPERATION REGIME OF SUBTERAHERTZ GYROTRONS

*M. Yu. Glyavin^{1,2}, N. A. Zavolsky¹, V. E. Zapevalov¹,
V. Yu. Zaslavsky^{1,2}, K. A. Lescheva², R. M. Rozental¹, A. S. Sedov¹*

¹Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences

²Nizhny Novgorod State University

The investigation of operation regimes of CW/263 GHz/1kW gyrotron, developed at IAP RAS/GYCOM Ltd., was made by various numerical methods. The influence of the azimuthal inhomogeneity (such as electron beam radial misalignments and tilt) has been studied. The method of average equations and 3D PIC codes (CST Studio Suite and KARAT) were used. Results, achieved by different methods, are in agreement with

experimental data. It is shown, that for feasible values of asymmetry, relative efficiency reduction can reach 40% from initial value. The possibility of future three-dimensional analysis of THz band gyrotrons with overside cavities and simultaneous azimuthal asymmetry of the electron beam and electrodynamic system by PIC codes has been demonstrated.

Keywords: Asymmetry of the electron beam and electrodynamic system has been demonstrated by PIC codes.

Глявин Михаил Юрьевич родился (1965) в Горьком. По окончании (1988) Горьковского политехнического института принят на работу в Институт прикладной физики РАН. Защитил кандидатскую диссертацию (1999), а затем – докторскую (2009). Научная деятельность связана с разработкой и исследованиями мощных источников СВЧ-излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн – гиротронов и разработкой технологических комплексов микроволновой обработки материалов на их основе. По этой тематике опубликовал около 100 работ в изданиях, индексируемых в Web of Science. С 2011 года заведует лабораторией микроволновых технологий ИПФ РАН, профессор ВШОПФ ННГУ, ведущий научный сотрудник ЗАО НПП ГИКОМ – признанного мирового лидера в промышленном производстве гироприборов. С 1999 года сотрудничает с Центром по разработке источников дальнего инфракрасного диапазона (Фукуи, Япония) и с университетом Мериленда (США) в области реализации ТГц гиротронов и создания импульсных магнитных систем со сверхсильными полями.



603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
E-mail: glyavin@appl.sci-nnov.ru

Завольский Николай Александрович родился (1956) в Ворсме Горьковской области. Окончил Горьковский государственный университет (1978) по специальности «математика». После окончания и до настоящего момента работает в Институте прикладной физики Академии наук СССР (в настоящее время ИПФ РАН). Область научных интересов: численные методы и разработка программного обеспечения в решении задач акустики, распространения радиоволн и электронно-волнового взаимодействия в гиротронах.



603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: zavolsky@appl.sci-nnov.ru

Завелалов Владимир Евгеньевич родился (1949) в городе Бор Горьковской области. Окончил радиофизический факультет Горьковского государственного университета (1972) по специальности «радиофизика». После окончания работал в Горьковском государственном университете, а с 1985 и до текущего момента работает в Институте прикладной физики Академии наук СССР (в настоящее время ИПФ РАН). В настоящее время – заведующий лабораторией мощных гиротронов для управляемого термоядерного синтеза. Защитил диссертации – кандидатскую (1985) и докторскую (2008). Докторская диссертация посвящена проблемам повышения эффективности генерации мощных гиротронов. Область научных интересов: теоретическое и экспериментальное исследование электронно-волновых процессов в мощных электронных приборах, а также разработка гиротронов для управляемого термоядерного синтеза, спектроскопии и технологических приложений. Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники (2011).



603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: zapev@appl.sci-nnov.ru



Заславский Владислав Юрьевич родился в 1981 году. Поступил в Нижегородский государственный университет (1998) на радиофизический факультет на специальность «радиофизика и электроника». Получил диплом бакалавра по направлению «радиофизика» (2002) и диплом магистра по направлению «радиофизика» (2004). Поступил в очную аспирантуру ННГУ на специальность 01.04.03 «Радиофизика». Защитил (2009) диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по теме «Исследование механизмов селекции мод в лазерах на свободных электронах с двумерной распределенной обратной связью». Старший научный сотрудник Института прикладной физики РАН, кандидат физ.-мат. наук. Область научных интересов – теория релятивистских электронных СВЧ-приборов, моделирование динамики СВЧ-генераторов со сверхразмерными электродинамическими системами. Опубликовал около 60 статей в отечественных и зарубежных журналах.

603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
E-mail:zas-vladislav@appl.sci-nnov.ru



Лещева Ксения Александровна родилась (1991) в Дзержинске Горьковской обл. Магистрант кафедры электроники радиофизического факультета ННГУ. В 2014 году получила диплом бакалавра по научному направлению «радиофизика». Область научных интересов: вакуумная электроника, методы численного моделирования электронных приборов СВЧ-диапазона.

603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
E-mail:ksenilescheva@mail.ru



Розенталь Роман Маркович родился (1977) в Горьком. Окончил радиофизический факультет ННГУ по специальности «электроника» (1999). С 1998 года работает в ИПФ РАН научным сотрудником. Основная область научных интересов – нестационарные процессы в мощных приборах вакуумной СВЧ-электроники. Автор и соавтор более 25 научных работ.

603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: rrz@appl.sci-nnov.ru



Седов Антон Сергеевич родился (1984) в Горьком, получил диплом бакалавра по научному направлению «физика» (2005, ННГУ) и диплом магистра по научному направлению «физика» (2007, ННГУ). После окончания ННГУ работает в ИПФ РАН младшим научным сотрудником. Область интересов – электронно-волновое взаимодействие в гиротронах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Опубликовал около 10 научных статей по данной тематике.

603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: anton-sedov@mail.ru