

Двухчастотные гиротроны с двумя независимо генерирующими пучками

М.Ю. Глявин, И.В. Железнов, В.Ю. Заславский, И.В. Зотова, Д.С. Крупин, Р.М. Розенталь, В.Н. Мануилов, А.С. Сергеев

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

Аннотация: Предложена концепция мощных источников непрерывного двухчастотного излучения на основе гиротронов с двумя соосными электронными пучками, независимо возбуждающими разные волноводные моды. С этой целью необходимо подбирать рабочие моды и радиусы инжекции электронов таким образом, чтобы каждый пучок имел максимальную связь с одной из мод и практически не был связан с другой. Выполнены расчеты для двух модификаций таких гиротронов, показавшие возможность практической реализации гиротрона с рабочими частотами 14 и 28 ГГц при возбуждении рабочих мод на 1-ой и 2-ой циклотронных гармониках и гиротрона с рабочими частотами 14.8 и 15.5 ГГц при работе только на основном циклотронном резонансе. Выходная мощность во всех рассмотренных случаях находится на уровне нескольких киловатт. Полученные параметры представляют интерес для плазменных приложений, включая нагрев плазмы для создания источников многозарядных ионов.

Ключевые слова: гиротрон, мощное двухчастотное излучения, нагрев плазмы, источники многозарядных ионов, подавление плазменных неустойчивостей

1. Введение

Создание непрерывных СВЧ-источников мощного многочастотного излучения представляет интерес для ряда приложений, связанных, в основном, с нагревом плазмы. В частности, при двухчастотном нагреве удастся подвить плазменные неустойчивости в источниках многозарядных ионов [1-4]. При этом спектральные компоненты излучения с мультикиловаттным уровнем мощности должны быть разделены интервалом от сотен мегагерц до единиц гигагерц. Поскольку наиболее интересные для обозначенных выше приложений частоты излучения находятся в длинноволновой части сантиметрового и в миллиметровом диапазоне длин волн, для генерации такого излучения целесообразно использовать источники гирорезонансного типа, в которых трубчатый винтовой электронный пучок взаимодействует с развитыми модами слабонеоднородных цилиндрических волноводов. Наиболее эффективными из таких источников являются гиротроны, селективно возбуждающие TE-моды вблизи критической частоты, в силу чего электронно-волновое взаимодействие в них слабо критично к разбросу скоростей электронов.

Обычно, гиротроны формируют монохроматическое (или близкое к такому) излучение со спектром в виде одной достаточно узкой линии. Естественно, что для формирования двухчастотного излучения можно использовать два гиротрона или, например, гиротрон и гиро-ЛБВ как в экспериментах [1,2]. В то же время, из соображений снижения стоимости за счет использования только одного источника питания и одной магнитной системы, представляет интерес реализация двухчастотных режимов генерации непосредственно в одном приборе. Например, при использовании внешних отражений с запаздыванием [5] можно обеспечить одновременное возбуждение двух продольных мод с частотным расстоянием порядка несколько десятков мегагерц, что, однако, недостаточно для приложений. Значительное увеличение межчастотного расстояния (до нескольких гигагерц) может быть

достигнуто при возбуждении соседних поперечных мод за счет вариации ведущего магнитного поля, для чего может быть использована дополнительная малоинерционная катушка [6]. В этом случае разные частотные компоненты возникают периодически, что представляет определенный интерес для плазменных приложений из-за конечного времени релаксации плазмы. Однако, вследствие инерционности магнитных систем, частота изменения магнитного поля не может быть очень большой.

В данной работе рассматривается возможность реализации одновременной двухчастотной генерации с большим расстоянием между частотными компонентами. С этой целью предложена концепция гиротрона с двумя электронными пучками, каждый из которых независимо возбуждает одну из мод цилиндрического волновода. Такие моды могут возбуждаться на 1-ой и 2-ой циклотронной гармонике, тогда расстояние между частотными компонентами может составлять более 10 ГГц. Возможен и другой случай, когда рабочие моды возбуждаются на одной циклотронной гармонике с расстоянием между спектральными компонентами в несколько сотен мегагерц. Выполнены расчеты конкретных двухчастотных гиротронов сантиметрового диапазона с мультикиловаттной мощностью генерируемого излучения.

2. Используемая расчетная модель и принцип выбора рабочих мод

Рассмотрим модель гиротрона с резонатором в виде отрезка волновода с радиусом R_w , запитываемого двумя соосными цилиндрическими электронными пучками (Рис.1), направляемыми однородным ведущим магнитным полем (Рис. 1). Будем считать, что эти пучки возбуждают две TE_{m_n, q_n} ($n=1,2$) моды на гармониках с номерами s_n в условиях синхронизма:

$$\omega_1^c \approx s_1 \omega_g, \quad \omega_2^c \approx s_2 \omega_g, \quad (1)$$

где $\omega_n^c = v_n / R_w$ – критическая частота n -ой моды с собственным числом v_n – соответствующее, ω_g – гирочастота, одинаковая для обоих пучков вследствие того, что взаимодействие осуществляется в единой магнитной системе. Коэффициент связи электронов с волной определяется согласно выражению [7]:

$$G_n(r) = \frac{J_{m_n - s_n}^2(v_n r / R_w)}{(v_n^2 - m_n^2) J_{m_n}^2(v_n)}, \quad (2)$$

где $J_m(x)$ – функция Бесселя, r – радиальная координата. Для независимого возбуждения рабочих мод необходимо подобрать радиусы вступила $R_{1,2}$ электронных пучков в резонатор так чтобы обеспечить условия:

$$\begin{aligned} G_1(R_1) = \max G_1(r), \quad G_1(R_2) = 0, \\ G_2(R_1) = 0, \quad G_2(R_2) = \max G_2(r), \end{aligned} \quad (3)$$

чтобы каждый из пучков имел максимальный коэффициент связи с одной из мод и, в идеале, был не связан с другой.

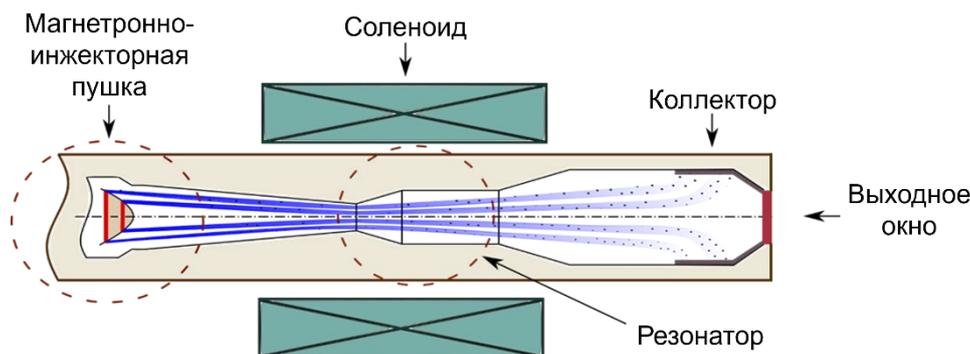


Рисунок 1. Принципиальная схема двухчастотного двух-пучкового гиротрона.

В случае, когда рабочие моды возбуждаются на 1-ой и 2-ой циклотронной гармониках, дополнительным условием является требование пропорциональности критических частот рабочих мод: $\omega_2^c / \omega_1^c \approx 2$. Тогда при заданном магнитном поле, обеспечиваются близкие условия электронно-волнового взаимодействия на обеих гармониках, в результате чего для можно обеспечить достаточно высокую эффективность возбуждения обеих компонент излучения. В совокупности с условием (3), это приводит к тому, что одна из мод должна быть модой шепчущей галереи с максимумом коэффициента связи вблизи стенок резонатора и практически нулевым значением G_n в центре системы, а вторая мода, напротив, должна быть сосредоточена вблизи центра резонатора.

Для взаимодействия на одной циклотронной гармонике следует учесть, что одна из мод неизбежно будет возбуждаться при больших отстройках от критической частоты, в режиме взаимодействия с обратной волной. В этом случае на эффективность взаимодействия на этой моде сильное влияние может оказывать разброс электронов по скоростям, что неизбежно приводит к снижению КПД взаимодействия. При больших отстройках указанное снижение может быть критическим. Таким образом, только соседние моды могут быть использованы, что ограничивает межчастотное расстояние.

Еще одним требованием, необходимым для обеих рассматриваемых конфигураций гиротронов, является необходимость селективного возбуждения рабочих мод в условиях конкуренции с возможными паразитными модами, которые также находятся в синхронизме с электронным потоком. Это накладывает требование на плотность спектра мод резонатора гиротрона, а, следовательно, – на возможную величину сверхразмерности резонатора. При этом встречным условием является достаточно большое значение указанной сверхразмерности для обеспечения приемлемой тепловой нагрузки на стенки резонатора при мультикиловаттной мощности непрерывной генерации.

В следующем разделе приведенные соображения использованы для расчетов конкретных двухчастотных гиротронов коротковолновой части сантиметрового диапазона. Для анализа использована самосогласованная модель электронно-волнового взаимодействия [8,9], учитывающая конкуренцию многих мод, а также разброс электронов по поперечным скоростям, выбранный на уровне ~25%.

3. Моделирование двухчастотных гиротронов сантиметрового диапазона

Для расчетов будем считать, что запитывающие электронные пучки идентичны и имеют следующие параметры: энергия пучка 30 кэВ, ток 1 А, питч-фактор 1.2. Такие параметры могут быть обеспечены на базе установок технологических гиротронов [10,11] этого же диапазона.

Рассмотрим сначала гиротрон с возбуждением рабочих мод на 1-ой и 2-ой циклотронных гармониках, для которого в качестве рабочих выберем моды $TE_{5,1}$ и $TE_{4,3}$ с критическими частотами 14.3 и 28 ГГц ($\omega_2^c/\omega_1^c \approx 1.958$) при радиусе волновода 21.6 мм. Согласно зависимостям коэффициентам связи от радиальной координаты (Рис. 2а,б), указанные моды удовлетворяют условию (3) при радиусах инжекции электронных пучков $R_1 = 17$ мм и $R_2 = 5.2$ мм.

Анализ нелинейной динамики гиротрона показывает, что конкурирующие моды (коэффициенты связи для которых также показаны на Рис. 2а,б) подавляются в процессе взаимодействия. В результате устанавливается режим стационарной генерации на двух выбранных рабочих модах (Рис. 2в). Этот режим реализуется в достаточно широкой области магнитных полей (Рис. 2г). При этом в оптимальной по магнитному полю рабочей точке обеспечивается мощность 7.4 и 4.7 кВт на 1-ой и 2-ой циклотронных гармониках, соответственно.

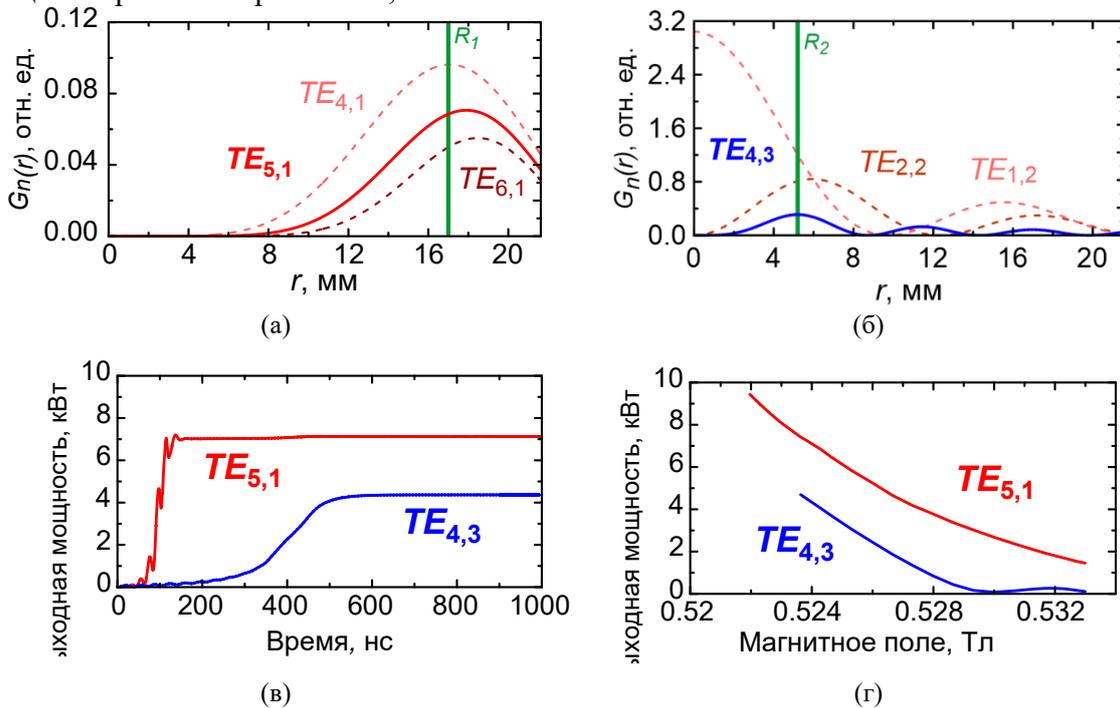


Рисунок 2. Расчеты гиротрона с рабочими частотами 14/28 ГГц. Зависимость от радиуса коэффициентов связи для рабочих (сплошные кривые) и паразитных (штриховые кривые) мод, взаимодействующих с внешним (а) и внутренним (б) электронными пучками на 1-й (красный) и 2-й (синий) циклотронных гармониках. (в) Установление стационарной генерации с одновременным возбуждением мод $TE_{5,1}$ и $TE_{4,3}$ на 1-ой и 2-ой циклотронных гармониках. (г) Зоны генерации рабочих мод в зависимости от ведущего магнитного поля.

Для второй модификации двухчастотного гиротрона в качестве рабочих мод были выбраны моды $TE_{-2,2}$ и $TE_{0,2}$ с критическими частотами 14.8 ГГц и 15.5 ГГц при радиусе регулярной части рабочего резонатора 21.6 мм. Параметры возбуждающих пучков выбирались такими же, как в предыдущем разделе. На рис. 3а представлены зависимости коэффициентов связи от радиальной координаты для этих мод, а также для моды $TE_{2,2}$, являющейся наиболее серьезным конкурентом. Видно, что рабочие моды могут независимо возбуждаться электронными пучками с радиусами $R_1 = 4$ мм и $R_2 = 12.1$ мм (показаны зелеными прямыми). На рис. 3б представлена зависимость мощности генерации рабочих мод от ведущего магнитного поля, паразитная мода при этом подавляется. Оптимальное значение мощности генерации составляет 9.6 кВт и 0.9 кВт для моды $TE_{0,2}$ и моды $TE_{-2,2}$, соответственно.

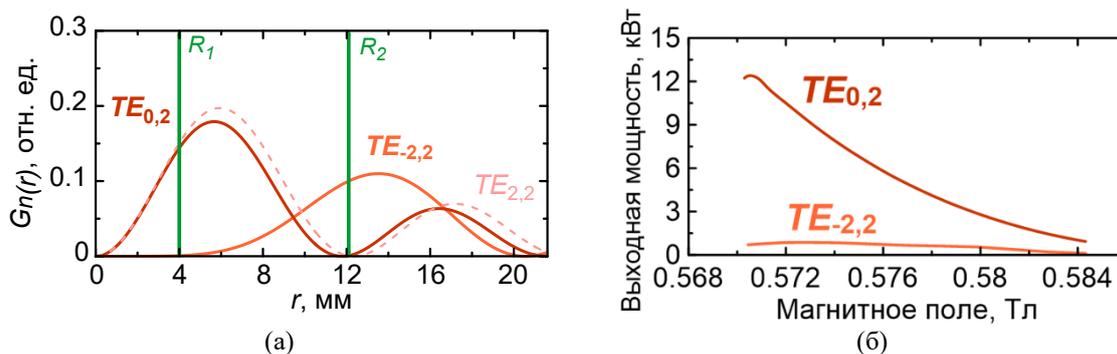


Рисунок 4. Расчеты гиротрона с рабочими частотами вблизи 15 ГГц. **(а)** Зависимость коэффициентов связи от радиуса для двух рабочих мод (сплошные линии) и паразитной моды (штриховая линия). **(б)** Зоны одновременной генерации рабочих мод в зависимости от ведущего магнитного поля

Заключение

Таким образом, результаты расчета показывают возможность достижения киловаттного уровня генерации на двух частотах в гиротроне, запитываемом двумя независимыми электронными пучками. Мощность генерации при этом может регулироваться отдельно для каждой моды при изменении параметров электронных пучков. Предложены два варианта реализации двухчастотного двухпучкового технологического гиротрона, а именно гиротрона, работающего на частотах 14 и 28 ГГц на 1-й и 2-ой циклотронных гармониках, и гиротрона с частотами 14.8 и 15.5 ГГц, работающего на основном циклотронном резонансе. Отметим, что, согласно предварительному анализу, независимое изменение параметров электронных пучков в обеих концепциях может быть осуществлено при использовании комбинированной системы формирования, состоящей из прямой и обращенной магнетронно-инжекторных пушек [12,13].

Работа выполнена в рамках проекта ИПФ РАН FFUF–2022–0007 «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона».

Список литературы

1. Skalyga V. A. et al. Microwave Emission for ECR Plasmas under Conditions of Two-Frequency Heating Induced by Kinetic Instabilities // AIP Conf. Proc. – 2018. – Т. 2011. – № 1. – С. 020015. doi: 10.1063/1.5053257.
2. Skalyga V. A. et al. Suppression of cyclotron instability in Electron Cyclotron Resonance ion sources by two-frequency heating // Physics of Plasmas – 2015. – Т. 22. – № 8. – С. 083509. doi: 10.1063/1.4928428.
3. Izotov I. V. et al. Broadband microwave emission spectrum associated with kinetic instabilities in minimum-B ECR plasmas // Physics of Plasmas. – 2017. – Т. 24. – № 4. – С. 043515. doi: 10.1063/1.4981387.
4. Izotov I. V. Kinetic instabilities of ECR plasmas in conventional ECRIS and in high-density gasdynamic devices // Symposium on Ion Sources and the Plasmas. Lanzhou, China. – 15-18 октября 2023.
5. Rozental. R. M. et al. Controlling the frequency of periodic self-modulation in gyrotrons with external reflections // Physics of Plasmas. – 2023. – Т. 30. – № 7. – С. 073302. <https://doi.org/10.1063/5.0153384>
6. Glyavin M. Yu. et al. The Ka-band 10-kW continuous wave gyrotron with wide-band fast frequency sweep // Review of Scientific Instruments – 2012. – Т. 83. – С. 074706. doi: 10.1063/1.4738644
7. Nusinovich. G. Introduction to the physics of gyrotrons – The Johns Hopkins Univ. Press. 2004.
8. Ginzburg N. S. et al. Improvement of Stability of High Cyclotron Harmonic Operation in the Double-Beam THz Gyrotrons // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2016. – Т. 44. – № 8. – С. 1303-1309. doi: 10.1109/TPS.2016.2585307

9. Bandurkin I. et al. Development of Third-Harmonic 1.2-THz Gyrotron with Intentionally Increased Velocity Spread of Electrons // IEEE Transaction on Electron Devices. – 2020. – Т. 67. – № 10. – С. 4432-4436. doi: 10.1109/TED.2020.3012524
10. Bykov Yu. et al. 24-84-GHz gyrotron systems for technological microwave applications // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2004. – Т. 32. – № 1. – С. 67–72. doi: 10.1109/TPS.2004.823904.
11. Proyavin M. D. et al. A Magneto-Armored Warm-Solenoid Based System for K-Band Gyrodevices // Instruments and Experimental Techniques. – 2020. – Т. 63. – № 1. – С. 97–100. doi: 10.31857/S0032816220010073.
12. Цимринг Ш. Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. Пер. с англ. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2012
13. Manuilov V. N. Multibeam gyrotrons // Conference digest of the 20-th International conference on infrared and millimeter waves. Orlando, USA. – 11-14 декабря, 1995.