

УДК 621.385

КОАКСИАЛЬНЫЙ ГИРОКЛИНОТРОН

А.А. КУРАЕВ, Д.В. ЛУКАШОНОК, А.К. СИНИЦЫН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 9 июля 2010

Предложен новый тип гиротрона – коаксиальный гироклиноotron с коническим резонатором. В таком гиротроне за счет коаксиально конической конфигурации резонатора образуется наклон поверхностей уровня электромагнитного поля («клин») относительно продольного движения электронов. В результате при достаточно большой длине области взаимодействия и оптимальной конфигурации коаксиально-конического резонатора все радиальные слои электронного потока, пересекая равное количество поверхностей уровня, оказываются в среднем в одинаковых условиях взаимодействия с полем резонатора. Приведенные в статье результаты численного моделирования и оптимизации конструкции коаксиального гироклиноотрона с коническим резонатором свидетельствуют о его реализуемости и перспективности в отношении существенного повышения мощности и КПД коротковолновых гиротронов. Средний электронный КПД коаксиального гироклиноотрона с широким радиусу электронным потоком уже на моде H_{04} конического резонатора достигает 22,7%.

Ключевые слова: гироклиноotron, коаксиально-конический резонатор, циклотронная частота, моделирование.

Введение

Одной из главных проблем при решении задачи повышения мощности гиротронов в коротковолновом диапазоне является динамическое расслоение широкого (для достижения высокой мощности) электронного потока (ЭП) в поперечно-неоднородном поле резонатора. Эта проблема может быть решена в гироклиноотроне, предложенном в 1969 г. в [1]. В этом приборе широкий спирализованный ЭП проходит наклонно (под углом φ) относительно плоскостей зеркал двухзеркального открытого резонатора. Благодаря этому, при оптимизированном φ каждый слой ЭП при достаточной протяженности резонатора имеет в среднем одинаковые условия взаимодействия и невзаимодействующих слоев (в узлах поля в обычном гиротроне) нет. В [2...4] на основе уточненной модели открытого резонатора было показано, что в таком приборе при правильном выборе угла наклона ($\varphi \sim 0,67$ рад) КПД взаимодействия достигает 55% при разбросе по слоям до 9%. Т.е. эффективность гироклиноотрона с толстым пучком не уступает максимальному КПД обычных гиротронов с тонким ЭП.

В настоящей работе обоснована реализуемость коаксиального конического резонатора на рабочей моде H_{0i} и выполнен расчет коаксиального гироклиноотрона. Показано, что КПД достигает 22,7% при угле наклона $\varphi = 0,57$ рад на моде H_{04} .

Устройство коаксиального гироклиноотрона

Схема рассматриваемого генератора представлена на рис. 1. Он отличается от классического гиротрона тем, что электродинамическая система выполнена в виде коаксиально-конусного резонатора 3, имеющего наклон зеркал относительно оси электронного пучка.

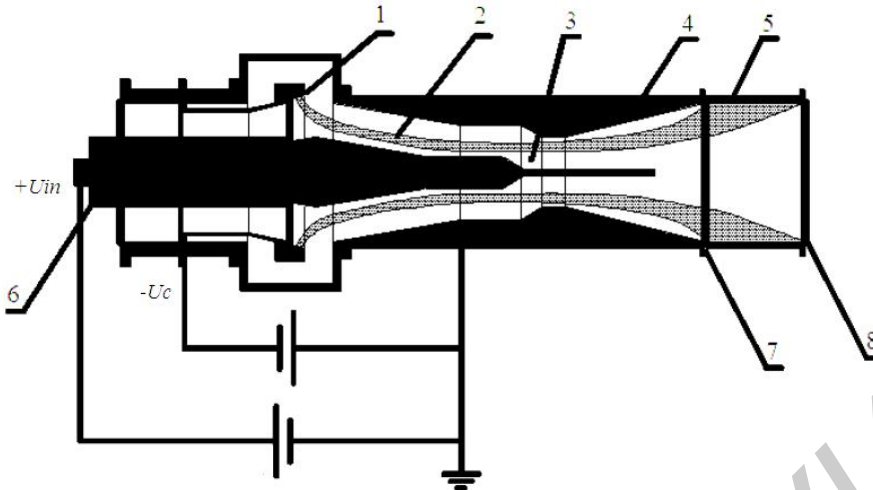


Рис. 1. Общий вид генератора: 1 – кольцевой катод обращенной магнетронной электроно-оптической системы, 2 – формируемый ей цилиндрический спирализованный поток, 3 – коаксиально-конусный резонатор, 4 – анод, 5 – коллектор электронов, 6 – внутренний проводник коаксиала, 7 – изолятор коллектора, 8 – вакуумноплатная диэлектрическая диафрагма. Внешние электромагниты фокусирующей и формирующей электронный поток магнитной системы не указаны

В основе механизма генерации рассматриваемого гироклинотрона лежит явление циклотронного резонанса:

$$(1 - \frac{v_z}{v_\phi})\omega \approx k\Omega, \quad (1)$$

где v_z – продольная скорость электрона, c – скорость света в пустоте, v_ϕ – фазовая скорость попутной парциальной волны стоячего поля, в нашем случае $v_\phi = c / \sin \varphi$, ω – частота генерации, $k = 1, 2, 3 \dots$ – гармоника циклотронной частоты, Ω – циклотронная частота ($\Omega = e/mB_0$), e – заряд электрона, m – масса электрона, B_0 – индукция статического фокусирующего магнитного поля. Далее используются безразмерная функция магнитного поля $F_0 = \frac{\Omega_0}{\omega} = \frac{eB_0}{m_0c}$, где m_0 – масса покоя электрона, e – заряд электрона, c – скорость света в пустоте.

Поскольку масса электрона m зависит от его кинетической энергии ($m = m_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$), и действие поля H_{011} резонатора изменяет v электронов в зависимости от фазы E_φ , в которой они находятся, изменяются m и, соответственно, Ω этих электронов. Это приводит к релятивистской фазовой группировке электронов, за счет чего обеспечивается отдача их энергии полю резонатора на одной из гармоник циклотронной частоты. За счет коаксиально-конической конфигурации резонатора образуется наклон поверхностей уровня электромагнитного поля («клин») относительно направления продольного движения электронов. В результате при достаточно большой длине области взаимодействия и оптимальном угле наклона φ все радиальные слои электронного потока, пересекая множество поверхностей уровня, оказываются в среднем в одинаковых условиях взаимодействия с полем резонатора.

Постановка задачи

Расчетная область резонатора 3 (рис. 1) представлена на рис. 2.

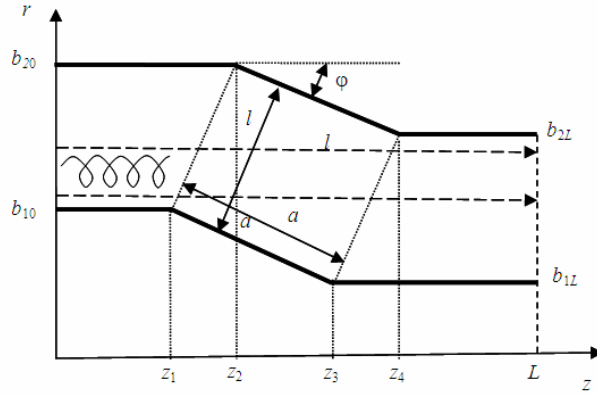


Рис. 2. Сечение генератора

Безразмерное волновое уравнение для потенциала симметричных H_{0i} – волн в коаксиальном волноводе можно преобразовать к скалярному дифференциальному уравнению Гельмгольца для комплексной функции двух переменных $u(r, z)$:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + W^2 \frac{u}{r} = 0, \quad (2)$$

при этом компоненты H_{0i} -волны выражаются через потенциал u по формулам:

$$\dot{B}_z = \frac{j}{W} \frac{\partial u}{r \partial r}; \quad \dot{B}_r = -\frac{j}{W} \frac{\partial u}{r \partial z}; \quad \dot{E}_\varphi = \frac{u}{r}. \quad (3)$$

В качестве исходных параметров были приняты: z_1 ; φ ; b_{1L} ; a , $\alpha_L = b_{2L}/b_{1L}$. Остальные параметры пересчитываются при помощи следующих выражений:

$$b_{2L} = b_{1L} \cdot \alpha_L;$$

$$l = (b_{2L} - b_{1L}) / \cos \varphi;$$

$$z_2 = z_1 + l \cdot \sin \varphi; \quad z_3 = z_1 + a \cdot \cos \varphi; \quad z_4 = z_2 + a \cdot \cos \varphi;$$

$$L = z_4 + z_1;$$

$$b_{10} = b_{1L} + a \cdot \sin \varphi; \quad b_{20} = b_{10} + l \cdot \cos \varphi;$$

$$\alpha_0 = b_{20}/b_{10}.$$

Резонатор на рабочем колебании H_{0i1} получается за счет того, что при определенном соотношении размеров на регулярных участках $[0, z_1]$ и $[z_4, L]$ волна H_{0i} является закритической, в то время как на участке $[z_1, z_3]$ сечение коаксиала близко к критическому для H_{0i} волны (поперечный резонатор).

Граничные условия для (2) ставятся следующим образом: при $r=b_1(z)$ и $b_2(z)$: $u=0$, при $z=0$:

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{jk_{z0}^i}{r} u = 2jk_{z0}^i A_0 e^+(r), \quad k_{z0}^i = \sqrt{W^2 - \chi_{0i}^2 / b_{10}^2}, \quad e_0^+(r) = \frac{J_1(\chi_{0i} r / b_{10})}{J_1(\chi_{0i})} - \frac{Y_1(\chi_{0i} r / b_{10})}{Y_1(\chi_{0i})}, \quad (4)$$

где χ_{0i} – i -й корень дисперсионного уравнения для входного волновода $J_1(\chi_{0i})Y_1(\chi_{0i}\alpha) - J_1(\chi_{0i}\alpha)Y_1(\chi_{0i}) = 0$, $\alpha_0 = b_{20}/b_{10}$; при $z=L$:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{jk_{zL}^i}{r} u = 2jk_{z0}^i A_L e^-(r), \quad k_{zL}^i = \sqrt{W^2 - \chi_{Li}^2 / b_{1L}^2}, \quad e_0^-(r) = \frac{J_1(\chi_{Li} r / b_{10})}{J_1(\chi_{Li})} - \frac{Y_1(\chi_{Li} r / b_{10})}{Y_1(\chi_{Li})}, \quad (5)$$

где χ_{Li} – i -й корень дисперсионного уравнения для выходного волновода $J_1(\chi_{Li})Y_1(\chi_{Li}\alpha) - J_1(\chi_{Li}\alpha)Y_1(\chi_{Li}) = 0$, $\alpha_L = b_{2L}/b_{1L}$.

Для распространяющихся волн: $W^2 - \chi_{0Li}^2 / b_{10L}^2 > 0$ и k_{z0L}^i – действительные волновые числа, для закритических волн: $W^2 - \chi_{0Li}^2 / b_{10L}^2 < 0$ и k_{z0L}^i – чисто мнимые волновые числа.

Здесь введены безразмерные геометрические параметры как отношение размерного значения параметра к коэффициенту $k = \lambda_0 / 2\pi$ ($\lambda_0 = 2\pi c / \omega_0$, c – скорость света в пустоте, ω_0 – опорная частота). Выражение коэффициента k через f имеет следующий вид: $k = c / 2\pi f$. Размерные величины, имеющие одинаковое написание с безразмерными помечены штрихом. $W = \omega / \omega_0$, ω – рабочая частота, $\vec{E} = \vec{E}' / E_m$, $\vec{B} = \vec{B}' c / E_m$ – электрическая и магнитная составляющие СВЧ поля, $E_m = \frac{m_0 \omega_0 c E_0}{eb_{10}}$, m_0, e – масса покоя и заряд электрона.

Методы и результаты решения электродинамической задачи

Задачи (1), (3) решались методом конечных треугольных элементов в системе MatLab. Приведенные ниже результаты показаны только для области взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем ($r \in [b_{2l}, b_{10}]$, $z \in [0, L]$).

Задавалась амплитуда H_{0l} -волны $A_L = 1$ в сечении $z = L$, в сечении $z = 0$ задавалось условие согласования $A_0 = 0$. Подбор параметров φ , b_{1L} , a , α_L для заданного номера i производился таким образом, чтобы k_{z0L}^i были мнимыми, в тоже время промежуточное волновое число (в области $[z_1, z_4]$) было действительным, а рассчитанное поле $u(r, z)$ имело явно выраженный максимум в области резонатора. После этого полученная таблица поля $u(r, z)$ нормировалась: $u(r, z) = u(r, z) / \max(u(r, z))$. Компоненты СВЧ-поля (3) в области движения электронов восстанавливались по интерполяционным формулам.

На рис. 3 представлены линии уровня потенциала $u(r, z)$, при условии резонанса рабочей моды H_{04} .

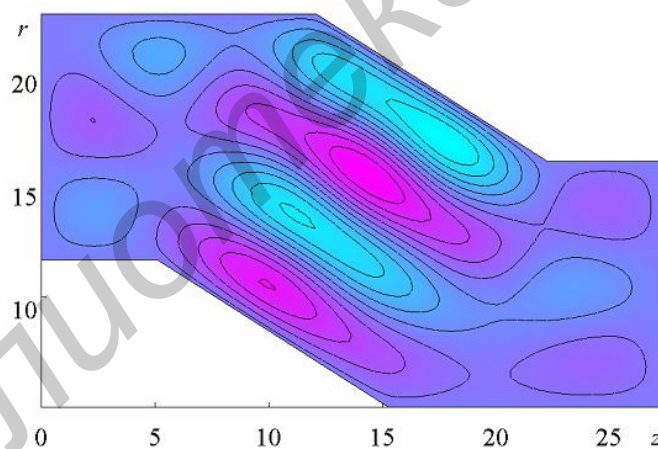


Рис. 3. Уровни потенциала $\text{real}[u(r, z)]$

Представленное на рис. 3 распределение потенциала $\text{real}[u(r, z)]$ получено при следующих значениях исходных параметров: $z_1 = 5,1$, $\varphi = 0,57$ рад, $b_{10} = 5,1$, $a = 12,1$; $\alpha_0 = 3,13$, что соответствует для $f = 100$ ГГц ($k = 4,78 \cdot 10^{-4}$) следующим размерам области взаимодействия: $b_{10} = 5,56$ мм, $b_{20} = 10,76$ мм, $b_{11} = 2,44$ мм, $b_{21} = 7,64$ мм, $L = 13,08$ мм, $a = 5,78$ мм, $l = 6,17$ мм.

Решение задачи электроники

Взаимодействие электронного пучка с СВЧ полем моделировалось на основе метода крупных частиц. Начало координат ($z = 0$) совместим с началом резонатора z_1 , ось z направим по ходу движения электронов. Безразмерные релятивистские уравнения движения крупных частиц запишем в виде [5]:

$$\begin{cases} \frac{dP_{r_i}}{dz} = \frac{1}{\beta_{z_i}} \left(\frac{\gamma_i \beta_{\varphi_i}^2}{r_i} - \beta_{\varphi_i} B_z \right); \\ \frac{dP_{\varphi_i}}{dz} = \frac{1}{\beta_{z_i}} \left(-\frac{\gamma_i \beta_{r_i} \beta_{\varphi_i}}{r_i} - E_{\varphi} - \beta_{z_i} B_r + \beta_{r_i} B_z \right); \\ \frac{dP_{z_i}}{dz} = \frac{1}{\beta_{z_i}} \beta_{\varphi_i} B_r; \\ \frac{dr_i}{dz} = \frac{\beta_{r_i}}{\beta_{z_i}}; \quad \frac{d\theta_i}{dz} = \frac{1}{\beta_{z_i}}; \quad \bar{P}_i = \gamma_i \bar{\beta}_i; \quad \gamma_i = \frac{1}{\sqrt{1 - \bar{\beta}_i^2}} = \sqrt{1 + P_{r_i}^2 + P_{\varphi_i}^2 + P_{z_i}^2} \end{cases} \quad (6)$$

Начальные условия имеют вид: $\theta_i(0) = \frac{2\pi}{N}(i+0,5)$; $r_i(0) = (b_{1l} + b_{20}) \cdot 0,5 + r_0 + d_{r_0}$;

$$P_{r_i}(0) = 0; \quad P_{z_i}(0) = \gamma_i \frac{\beta_{e0}}{\sqrt{1+q^2}} \quad P_{\varphi_i}(0) = \gamma_i \frac{\beta_{e0} \cdot q}{\sqrt{1+q^2}}.$$

Здесь i – номер частицы, r_0 – радиус ларморовской орбиты, d_{r_0} – сдвиг по вертикали от оси пучка, $\bar{\beta}_i = \vec{v}_i / c$, $\theta_i = \omega t_i$, t_i – относительная скорость и время пролета частицей сечения z , q – питч фактор.

Суммарный электронный КПД рассчитывался по формуле

$$\eta_e(z) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \frac{\gamma_0 - \gamma_{li}(z)}{\gamma_0 - 1}. \quad (7)$$

Фазовую группировку электронов на частоте ω определяет функция группировки:

$$G_{rl}(z) = \frac{1}{N_{es}} \left[\left(\sum_{i=1}^{N_{es}} \cos \theta_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{N_{es}} \sin \theta_i \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (8)$$

Расчет коаксиального гироклинотрона

Для решения задачи электроники использовалась программа, созданная в системе Matlab. В результате был получен максимальный (при $dr_0 = dr_{opt}$) электронный КПД 27% при следующих значениях параметров: $F_0 = 0,9549$; $E_0 = 0,6968$; $q = 2$; $\beta_0 = 0,5$. Расчет производился $N_{es} = 8$. На рис. 4 представлены: a – графики траекторий электронов вдоль оси z , b – графики зависимостей КПД, средних β_r , β_z и функции группировки (8) от координаты z ($\varphi = 0,57$ рад, $\beta_0 = 1/\sin \varphi = 1,8$, $r_0 = 12,7$).

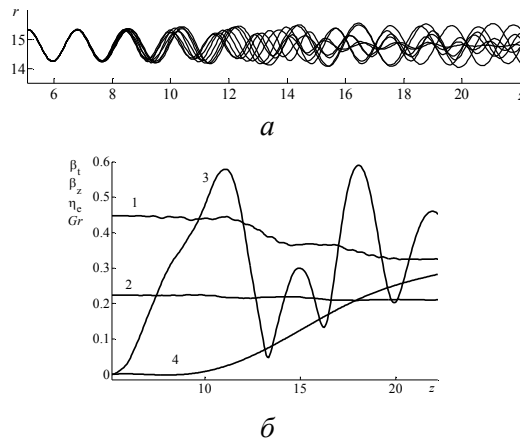


Рис. 4. Характеристики коаксиального гироклинотрона: траекторий электронов – (а); 1 – $\beta_r(z)$; 2 – $\beta_z(z)$; 3 – $Gr(z)$; 4 – $\eta_e(z)$ – (б)

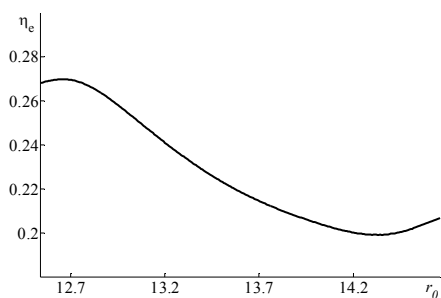


Рис. 5. Зависимость изменения КПД от параметра отклонения электронного слоя по оси

На рис. 5 представлена зависимость η_e электронных слоев от радиуса их встречи в область взаимодействия. Видно, что разброс по слоям составляет не более 7%.

Как следует из зависимости, $\eta_{e\min}$ слоев с наихудшим расположением оказывается не меньшим 20%, в то время как в обычном гиротроне он равен нулю (узел действующих сил поля). Средний по слоям $\eta_e \approx 22\%$, что достаточно близко к максимально достижимому КПД гиротрона с тонким по r_0 электронным потоком.

Заключение

Приведенные в статье результаты численного моделирования и оптимизации конструкции коаксиального гироклинотрона с коническим резонатором свидетельствует о его реализуемости и перспективности в отношении существенного повышения мощности и КПД коротковолновых гиротронов.

COAXIAL GYROKLINOTRON

A.A. KURAYEV, D.V. LUKASHONOK, A.K. SINITSYN

Abstract

A new kind of gyrotron – coaxial gyroklinotron with a conical cavity is presented. In such a gyrotron by coaxial conical configuration of the cavity formed by the slope of the surface level of the electromagnetic field («wedge») on the longitudinal motion of electrons. As a result, at sufficiently large length of the interaction region and the optimal configuration of coaxial-conical cavity all radial layers of the electron beam crosses an equal amount of the surface level, are on average under the same conditions of interaction with the cavity field. The results of numerical simulation and design optimization of coaxial gyroklinotron conical cavity, given in the paper, are evidence of its feasibility and prospects for a substantial increase power and efficiency of short-wave gyrotrons. Electronic efficiency coaxial gyroklinotron with a wide radius of the electron beam reaches 22,7% at mode H_{04} of conical cavity.

Литература

1. Кураев А.А. // Радиотехника и электроника. 1969. Т. 14, №9. С. 1614–1622.
2. Kurayev A.A., Sinitsyn A.K. // Proceeding of the First IEEE International Vacuum Electronic Conference, April 27-29, 2004, Monterey, USA, P 2, 5.
3. Кураев А.А., Сеницын А.К. // 14 международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 13-17 сентября 2004, Севастополь. С. 215–217.
4. Кураев А.А., Сеницын А.К. // Радиотехника. 2004. №9. С. 48–53.
5. Батура М.П., Кураев А.А., Сеницын А.К. Основы теории расчета и оптимизации современных приборов СВЧ. Минск, 2006.