



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-68-72>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.385.6

ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ЧЕТЫРЕХЗЕРКАЛЬНЫЙ ГИРОТРОН СО СКРЕЩЕННЫМИ ПОЛЯМИ

А. А. КУРАЕВ, В. В. МАТВЕЕНКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 02.05.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. В четырехзеркальном гиротроне широкий мультивинтовой электронный поток, находясь в скрещенных электрическом и продольном магнитном полях, дрейфует со скоростью $v_d = E_0/B_0$ в направлении распространения T -волны между зеркалами резонатора (попутная волна) или в противоположном направлении (встречная волна). При этом в соответствии с эффектом Доплера частота генерации ω определяется из условий синхронизма как $\omega \approx k\omega_n(1 \pm \beta_d)$, $\beta_d = v_d/c$. Таким образом, изменение E_0 меняет ω , т. е. осуществляется электрическая перестройка частоты. В статье приведена схема конструкции двухпучкового четырехзеркального гиротрона. Расчеты проводили для $\beta_d = 0,5$, $q = \beta_{\parallel}/\beta_{\perp} = 2$, взаимодействие осуществлялось на номере гармоники частоты $k = 1$. Полоса перестройки составила 20 %. Максимальный КПД – 48 %, минимальный – 33 %. Поскольку расчеты выполняли для безразмерных параметров, т. е. имеющих универсальный характер, физические характеристики гиротрона при длине волны $\lambda = 6$ мм ($f_0 = 50$ ГГц) и нагруженной добротности резонатора $Q_n = 200$ были следующими: ток пучка электронов $I_0 = 60$ А, $B_0 = 2$ Тл, напряжение $U_0 = 79$ кВ, КПД = 48 %.

Ключевые слова: гиротрон, электрическая перестройка частоты, пьезоэлектрическая перестройка резонатора, полоса перестройки, КПД, фазовая селекция электронов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Кураев, А. А. Электрически перестраиваемый четырехзеркальный гиротрон со скрещенными полями / А. А. Кураев, В. В. Матвеев // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 5. С. 68–72. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-68-72>.

ELECTRICALLY TUNABLE FOUR-MIRROR GYROTRON WITH CROSSED FIELDS

ALEXANDER A. KURAYEV, VLADIMIR V. MATVEYENKA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 02.05.2023

Abstract. In a four-mirror gyrotron, a wide multi-screw electron beam, being in crossed electric and longitudinal magnetic fields, drifts with a velocity $v_d = E_0/B_0$ in the direction of the T -wave propagation between the resonator mirrors (co-current wave) or in the opposite direction (counter-propagating wave). In this case, in accordance with the Doppler effect, the generation frequency ω is determined from the synchronism conditions as $\omega \approx k\omega_n(1 \pm \beta_d)$, $\beta_d = v_d/c$. Thus, a change in E_0 changes ω , i. e. electrical frequency tuning is carried out. The article presents a diagram of the design of a two-beam four-mirror gyrotron. The calculations were carried out for $\beta_d = 0.5$, $q = \beta_{\parallel}/\beta_{\perp} = 2$, the interaction was carried out at the frequency harmonic number $k = 1$. The tuning band was 20 %. The maximum

efficiency is 48 %, the minimum is 33 %. Since the calculations were performed for dimensionless parameters, i.e., having a universal character, the physical characteristics of the gyrotron at a wavelength $\lambda = 6$ mm ($f_0 = 50$ GHz) and a loaded resonator quality factor $Q_l = 200$ were as follows: electron beam current $I_0 = 60$ A, $B_0 = 2$ T, voltage $U_0 = 79$ kV, efficiency = 48 %.

Keywords: gyrotron, electrical frequency being tuned, piezoelectric resonator being tuned, tuning band, efficiency, electron phase selection.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

For citation. Kurayev A. A., Matveyenka V. V. (2023) Electrically Tunable Four-Mirror Gyrotron with Crossed Fields. *Doklady BGUIR*. 21 (5), 68–72. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-68-72> (in Russian).

Введение

Важным требованием к мощным выходным генераторам в современных системах радиолокации и радиопротиводействия является возможность быстрой перестройки частоты. Обычные гиротроны таким свойством не обладают, поскольку их резонаторы, образованные отрезком нерегулярного пологого волновода, не могут быть перестроены. В предлагаемой конструкции четырехзеркального гиротрона перестройка резонатора возможна за счет перемещения зеркал, которое может осуществляться с помощью электрического сигнала, подаваемого на пьезопакеты, механически связанные с зеркалами резонатора. В [1–6] поперечное электрическое поле предлагалось использовать для селекции бегущих волн в гиротронах с широким электронным потоком и четырехзеркальным резонатором бегущих T -волн. Это давало возможность узкополосной электрической перестройки частоты в диапазоне длины волны $\lambda = 6$ мм за счет изменения $E_0/(B_0c)$ (E_0 – напряженность поперечного электрического поля; B_0 – продольное магнитное поле; c – скорость света в вакууме) от 0 до 0,05 при одновременном изменении напряжения на пьезопакете $U_{упр}$ от 0 до 1600 В, управляющего расстоянием между зеркалами резонатора [5]. При этом в соответствии с эффектом Доплера частота генерации ω определяется из условий синхронизма как $\omega \approx k\omega_n(1 \pm \beta_d)$, $\beta_d = v_d/c$ (k – номер гармоники частоты, ω_n – угловая частота вращения электронов). Знак «+» берется, если волна попутная, «-» – если встречная. Таким образом, изменение E_0 меняет ω , т. е. осуществляется электрическая перестройка частоты. Данная возможность рассмотрена в статье. Ранее использование радиального электрического поля в коаксиальных гироклистронах с трубчатыми поливинтовыми электронными потоками было предложено в [1] для компенсации углового разброса скоростей электронов в трубке дрейфа и для фазовой модуляции сигнала.

Четырехзеркальный гиротрон с пьезоперестройкой резонатора

На рис. 1 представлена принципиальная схема конструкции четырехзеркального гиротрона с управляющим электродом и пьезопакетом механической перестройки резонатора.

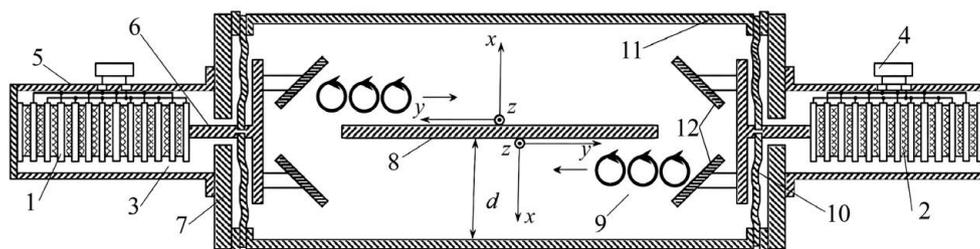


Рис. 1. Схема конструкции четырехзеркального гиротрона со скрещенными полями и пьезоперестройкой резонатора

Fig. 1. Construction diagram of the four-mirror gyrotron with crossed fields and with a piezo resonator being tuned

На рисунке приведены следующие обозначения: 1 – прокладки из медной фольги для передачи управляющего напряжения; 2 – пьезоэлектрические шайбы из титаната бария; 3 – наборный пьезопакет; 4 – блок управляющего напряжения; 5 – термостабилизирующий корпус из инвара; 6 – штырь перемещения (толкатель); 7 – опорная шайба внешнего корпуса гиротрона 11;

8 – положительно заряженный управляющий электрод с неотражающей (рассеивающей или поглощающей) поверхностью, как и внешний корпус гиротрона 11; 9 – широкий (по ведущим центрам) спирализованный электронный поток; 10 – вакуумноплотная гибкая мембрана, жестко связанная со штырем; 12 – пара зеркал резонатора, перемещаемая в направлении $\pm u$ толкателем от пьезоэлемента. На схеме конструкции четырехзеркального гиротрона перестройка резонатора осуществляется за счет перемещения зеркал 12, которое реализуется при помощи управляющего напряжения $U_{упр}$, подаваемого на пьезоэлементы, механически связанные с зеркалами резонатора.

Зависимость удлинения пьезоэлемента Δl от управляющего напряжения $U_{упр}$ приведена в [5]. Высота пьезоэлемента вместе с кожухом 80 мм, диаметр 30 мм. При семи пьезоэлементах в пьезоэлементах максимальное его удлинение Δl для $U_{упр} = 1600$ В составляет 300 мкм. При увеличении числа пьезоэлементов удлинение Δl может быть пропорционально увеличению их количества.

Математическая модель четырехзеркального гиротрона

Уравнения движения электронов в прямоугольной системе координат, ориентированной так, как это показано на рис. 1, в безразмерных переменных имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{d(\gamma_i \bar{\beta}_i)}{dz} = -\frac{1}{\beta_{zi}} (\bar{E} + [\bar{\beta}, \bar{B}]); \\ \frac{d\bar{r}_{\perp i}}{dz} = \frac{\bar{\beta}_{\perp i}}{\beta_{zi}}, \quad \frac{d\theta_i}{dz} = \frac{1}{\beta_{zi}}, \quad i = \overline{1, N}, \end{cases} \quad (1)$$

где i – номер электрона (крупной частицы); $z = z'\omega/c$; $\bar{r}_{\perp i} = \bar{x}_0 x_i + \bar{y}_0 y_i = \frac{\omega_0}{c} r'_{\perp i}$; $\beta_{xi} = v_{xi}/c$; $\beta_{yi} = v_{yi}/c$; $\beta_{zi} = v_{zi}/c$; $\theta_i = \omega_0 t_i$; x_i, y_i, z_i, θ_i – безразмерные координаты и время частиц в декартовой системе координат; γ_i – релятивистский масс-фактор, $\gamma_i = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_i^2}}$; ω_0 – центральная частота

полосы перестройки при $E_0 = 0$; $\bar{E} = \bar{x}_0 A \cos[W(\theta_i \pm y_i)] + \bar{x}_0 E_0$; $\bar{B} = \pm \bar{z}_0 A \cos[W(\theta_i \pm y_i)] + \bar{z}_0 F$; $W = \omega/\omega_0$; $A = \frac{eE_m}{m_0 \omega_0 c}$; $F = \frac{eB_0}{m_0 \omega_0}$; $E'_0 = \frac{\Delta V_0}{d}$; $E_0 = \frac{eE'_0}{m_0 \omega_0 c}$; E_m – амплитуда волны; B_0 – продольное магнитное поле; ΔV_0 – разность потенциалов положительной центральной пластины и корпуса гиротрона; e, m_0 – заряд и масса покоя электрона; c – скорость света в вакууме; знак «+» относится к попутным (относительно u -дрейфа электронов), «-» – к встречным T -волнам; A, F, E_0, W – безразмерные амплитуда волны, продольное магнитное поле, напряженность поперечного электрического поля и частота соответственно.

Для решения дифференциального уравнения (1) были использованы следующие начальные условия: $x_{0i}(z=0) = r_0 \cos \varphi_i$; $y_{0i}(z=0) = r_0 \sin \varphi_i$; $\varphi_i = 2\pi i/N$; $\beta_{x0i} = -\beta_{\perp} \sin \varphi_i$; $\beta_{y0i} = \beta_{\perp} \cos \varphi_i$; $\beta_{z0i} = \beta_{\parallel}$; $r_0 = \frac{\beta_{\perp} \gamma_0}{F}$; $\gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_0^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_{\perp}^2 - \beta_{\parallel}^2}}$; $z = \bar{0}, L$; $L = \frac{W z'_0 \omega}{c}$.

Электронный КПД η_e определяли по формуле

$$\eta_e(z) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_0 - \gamma_i(z)}{\gamma_0 - 1}. \quad (2)$$

В соответствии с [1–3] рабочий ток гиротрона рассчитывали из выражения

$$I_0 = \frac{A^2}{\eta} \frac{V_k 679}{Q_k (\gamma_0 - 1)}, \quad (3)$$

где V_k – безразмерный объем резонатора, занятый бегущей T -волной, $V_k = \left(\frac{\omega_0}{c}\right)^3 V'_k$; Q_k – нагруженная добротность резонатора.

Результаты расчета четырехзеркального гиротрона при различных W и соответствующих им E_0 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета четырехзеркального гиротрона
Table 1. Calculation results for a four-mirror gyrotron

Показатель / Index	Встречная волна / Back wave						Попутная волна / Traveling wave					
W	0,840	0,850	0,870	0,910	0,950	1,000	1,000	1,050	1,075	1,100	1,140	1,160
E_0	0,155	0,145	0,125	0,095	0,050	0	0	0,070	0,105	0,125	0,145	0,165
A	0,010	0,010	0,010	0,011	0,010	0,010	0,012	0,013	0,014	0,018	0,027	0,038
КПД	0,190	0,330	0,410	0,480	0,471	0,317	0,320	0,370	0,430	0,430	0,470	0,430

При расчете всех показателей в табл. 1 использовали следующие данные: $F = 1,1$, $\beta_0 = 0,5$, $L = 20,5$, $q = 2$. Эти данные полностью коррелируют с приведенными в [2, 3, 6]. В процессе вычислений функция $\frac{A^2}{\eta(A)}$ имела положительную производную, что в соответствии с (3) означает положительную производную $\frac{dI_0}{dA}$, т. е. режим самовозбуждения для всех показателей в табл. 1 – «мягкий». Расчет физических параметров для $\lambda_0 = 6$ мм ($f_0 = 50$ ГГц) и при $Q_H \sim 200$ дал следующие характеристики: $I_0 \sim 60$ А, $B_0' = 2$ Тл, $U_0 \sim 79$ кВ, $E_m < 100$ кВ/см. При этом весь диапазон перестройки резонатора обеспечивался двумя пьезопакетами с непрерывным по диапазону изменением $U_{упр}$. Разность потенциалов ΔV_0 , входящая в E_0 , начиналась с максимального $E_0 = 0,155$ на низшей частоте $W = 0,84$ настройки резонатора (встречные волны) и достигало нуля при $W = 1$; затем вновь повышалось, достигая значения $E_0 = 0,165$ при $W = 1,16$ (попутные волны).

На рис. 2 показана проекция траекторий движения электронов на плоскость yz для $W = 0,91$ (встречная волна): электроны равномерно дрейфуют в направлении $-y$, их винтовые траектории сближаются, а радиусы вращения большинства электронов уменьшаются вследствие отдачи энергии вращения электромагнитному полю T -волны.

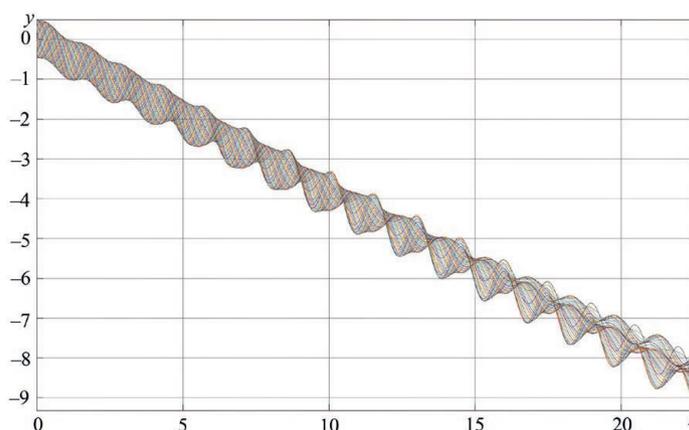


Рис. 2. Траектория электронов в плоскости yz для варианта гиротрона с $W = 0,91$
Fig. 2. Electron trajectory in the yz plane for the gyrotron version with $W = 0.91$

Заключение

1. В четырехзеркальных гиротронах со скрещенными электрическим и продольным магнитным полями возможна электрическая перестройка частоты при одновременной электрической пьезоперестройке частоты резонатора в полосе 16 %.

2. Возможно значительное уменьшение требуемой индукции магнитного поля, как и в гирогелитроне.

3. В отличие от гирогелитрона в четырехзеркальных гиротронах мощность может быть значительно увеличена.

4. Можно использовать скрещенные поля в электрически перестраиваемых гиро-ЛЮВ и гиро-ЛБВ (перестраиваемая полоса усиления), в которых нет необходимости пьезоперестройки каких-либо структур.

Список литературы

1. Кураев, А. А. Гиротроны с резонаторами бегущей T -волны / А. А. Кураев, А. К. Синицын // Материалы «Крымико-2002», г. Севастополь. С. 176–177.
2. Кураев, А. А. Перспективы повышения мощности коротковолновых гиротронов / А. А. Кураев, А. К. Синицын // Радиотехника. 2004. № 9. С. 48–53.
3. Кравченко, В. Ф. Гирорезонансные приборы: принцип действия, нелинейная теория, достижения и перспективы / В. Ф. Кравченко, А. А. Кураев // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2006. № 9. С. 13–60.
4. Кураев, А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Синицын. М.: Инфра-М, 2016. 424 с.
5. Еремка, В. Д. Сверхмощный гиротрон с пьезоэлектрической перестройкой зеркального резонатора бегущей T -волны / В. Д. Еремка, А. А. Кураев, А. К. Синицын // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2005. № 1. С. 78–82.
6. Генератор на циклотронном резонансе: пат. Респ. Беларусь № 11964 / А. А. Кураев, А. С. Рудницкий, А. К. Синицын. Оpubл. 11.07.2007.

References

1. Kurayev A. A., Sinitsyn A. K. (2002) Gyrotrons with Traveling T -Wave Resonators. *Proceedings of "Crymiko-2002", Sevastopol*. 176–177 (in Russian).
2. Kurayev A. A., Sinitsyn A. K. (2004) Prospects for Increasing the Power of Short-Wavelength Gyrotrons. *Radioengineering*. (9), 48–53 (in Russian).
3. Kravchenko V. F., Kurayev A. A. (2006) Gyroresonance Devices: Principle of Operation, Nonlinear Theory, Achievements and Prospects. *Foreign Radioelectronics. Advances in Modern Radioelectronics*. (9), 13–60 (in Russian).
4. Kurayev A. A., Popkova T. L., Sinitsyn A. K. (2016) *Electrodynamics and Propagation of Radio Waves*. Moscow, Infra-M Publ. 424 (in Russian).
5. Eremka V. D., Kurayev A. A., Sinitsyn A. K. (2005) Heavy-Duty Gyrotron with Piezoelectric Tuning of the Mirror Resonator of a Traveling T -Wave. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*. (1), 78–82 (in Russian).
6. Kurayev A. A., Rudnitsky A. S., Sinitsyn A. K. *Cyclotron Resonance Generator*. Patent of the Republic of Belarus No 11964. Publ. 11.07.2007 (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Кураев А. А., д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Матвеев В. В., к. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-89-56
E-mail: kurayev@bsuir.by
Кураев Александр Александрович

Information about the authors

Kurayev A. A., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Matveyenka V. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Computational Methods and Programming Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-89-56
E-mail: kurayev@bsuir.by
Kurayev Alexander Alexandrovich