

УДК 621.385.69

ЭЛЕКТРОННАЯ ПЕРЕСТРОЙКА РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ ГИРОТРОНА С ЭШЕЛЕТНОЙ СТРУКТУРОЙ

Л. Н. Агапов¹, С. Д. Богданов¹, Н. П. Венедиктов², С. Н. Власов², Е. В. Копосова²,
В. И. Курбатов¹, Е. А. Солуянова¹

¹ НПП «ГИКОМ»,

² Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

В настоящей статье обсуждаются возможности создания мощных гиротронов с электрической перестройкой их рабочих частот, основанной на использовании эшелетных систем. Последние обладают не только высокими селективными свойствами, но и способностью понижать добротность мод до полного исчезновения резонансных свойств при сохранении структуры электромагнитного поля, обеспечивающей его эффективное взаимодействие с электронным пучком. Описывается гиротрон с эшелетным резонатором, в котором добротность рабочей моды была ниже минимальной дифракционной добротности и рабочая частота перестраивалась в широком диапазоне.

Гиротроны — вакуумные приборы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн [1]. Взаимодействие электронного пучка с электромагнитной волной и генерация сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения в гиротроне происходит в его резонаторе. Конструктивно резонатор выполняется в виде фигуры вращения с переменным сечением [2, 3]. Наличие осевой симметрии резонатора необходимо для достижения максимальной эффективности прибора. Классический гиротрон с цилиндрическим резонатором работает на фиксированной частоте. Однако в радиолокации, спектроскопии и в ряде систем управляемого термоядерного синтеза часто требуется возможность перестройки частоты. В обычных аксиально-симметричных структурах реализовать перестройку частоты можно только в пределах ширины резонансного контура, которая определяется добротностью используемой резонаторной моды. Перестройка частоты с её выходом за пределы ширины резонансного контура моды осуществляется либо механическим изменением поперечного сечения резонатора или его продольной длины [4, 5] (что сложно конструктивно), либо в результате использования квазизамедляющих систем вместо резонаторов [6]. В последнем случае частота может перестраиваться электронным путём, но реализовать это удаётся только для giroприборов со сравнительно малым поперечным сечением, что связано с ухудшением селекции волн при увеличении сечения пространства взаимодействия. Рабочие частоты излучения гиротронов с большим поперечным сечением резонаторов при изменении магнитного поля меняются скачками при переходе с одной моды резонатора на другую [7]. При этом варьируются также поперечная структура излучаемого электромагнитного поля и генерируемая мощность. В данной статье обсуждается возможность создания мощных гиротронов с электронной перестройкой частоты на основе использования эшелетных систем [8–10]. Последние обладают не только высокими селективными свойствами, но и способностью понижать добротность мод до полного исчезновения резонансных свойств пространства взаимодействия при сохранении структуры электромагнитного поля, обеспечивающей его эффективное взаимодействие с электронным пучком.

Моды резонатора гиротрона характеризуются азимутальным индексом m , радиальным индексом p , продольным индексом q при заданной длине резонатора $L \gg \lambda$, где λ — длина волны высокочастотного излучения. Схематически профиль резонатора гиротрона с радиусом a показан на рис. 1. В работе [11] было отмечено, что основная (т. е. имеющая продольный индекс $q = 1$)

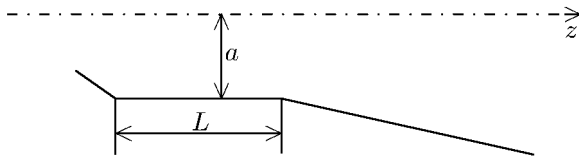


Рис. 1. Профиль резонатора гиротрона

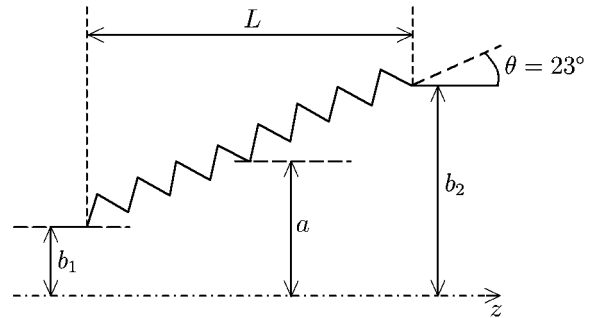


Рис. 2. Профиль эшелетного резонатора

мода такого резонатора имеет минимальную дифракционную добротность

$$Q = \frac{4\pi L^2}{\lambda^2}. \quad (1)$$

Согласно [11], минимальная дифракционная добротность определяется временем жизни поля и зависит только от протяжённости поля вдоль осевой координаты. Авторам [11] оказалось удобным принять за протяжённость поля длину резонатора, следствием чего явился коэффициент 4π в (1).

Частотную отстройку $\Delta\omega_q$ мод с низшими индексами q от критической частоты волновода с радиусом a можно оценить с помощью формулы

$$\Delta\omega_q = \left(\sqrt{k_{\perp}^2 + \pi^2 q^2 / L_q^2} - k_{\perp} \right) c \approx \frac{\pi^2 q^2}{2k_{\perp} L_q^2} c = \frac{\pi q^2 \lambda}{4L_q^2} c, \quad (2)$$

где $k_{\perp} = \nu_{m,p}/a$, $\nu_{m,p}$ — m -й корень производной функции Бесселя p -го порядка для используемых в гиротронах H -мод, c — скорость света, L_q — протяжённость поля моды с индексом q . Для моды с $q = 1$ имеем $L_1 \approx L$, для моды с $q = 2$ величина L_2 несколько больше L , поскольку её поле в большей степени, чем поле моды с $q = 1$, проникает за пределы резонатора.

Из формул (1) и (2) следует, что разность частот мод с продольными индексами $q = 1$ и 2 и с одинаковой поперечной структурой, равная

$$\Delta\omega_2 - \Delta\omega_1 = \frac{3\pi\lambda}{4L^2} c, \quad (3)$$

несколько превышает сумму полуширин $\delta\omega_1/2 = \omega/(2Q_1)$ и $\delta\omega_2/2 = \omega/(2Q_2)$ резонансных кривых этих мод

$$\frac{\delta\omega_1}{2} + \frac{\delta\omega_2}{2} = c \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\lambda^2}{8\pi L^2} + \frac{\lambda^2}{4\pi L^2} \right) = c \frac{3\lambda}{4L^2} = \frac{\Delta\omega_2 - \Delta\omega_1}{\pi}. \quad (4)$$

При получении равенств (3) и (4) мы предполагали, что $L_1 = L_2 = L$, но время высвечивания из резонатора моды с $q = 2$ в два раза меньше, чем моды с $q = 1$, т. к. при $L_1 = L_2$ групповая скорость пакета волн, образующих моду с $q = 2$, больше. Из (4) следует, что даже резонатор с минимальной дифракционной добротностью имеет моды с фиксированной структурой поля и возможностью изменения их частоты в полосе $\delta\omega_1$.

Для получения возможности перестройки частоты необходимо уменьшить добротность резонатора до величины, существенно ниже, чем минимальная дифракционная добротность (1). Такая ситуация достигается при существенном превышении омических потерь над дифракционными даже в случае достаточно большой величины последних. Она была использована при

построении работающего на второй гармонике гирочастоты [12] гиротрона с электронной перестройкой частоты, причём расчётная добротность рабочей моды в нём была ниже минимальной дифракционной добротности в полтора раза. Уменьшение добротности ниже минимального дифракционного уровня возможно также в эшелетном резонаторе. Такие резонаторы, обладающие высокой степенью селекции мод, и основанные на них гиротроны описаны в [8–10, 13]. Добротность осесимметричной моды в эшелетном резонаторе может быть оценена с помощью формулы

$$Q = -\frac{4\pi a}{\lambda \ln |R|}, \quad (5)$$

где a — средний радиус резонатора (рис. 2), $|R|$ — коэффициент отражения по мощности радиального волнового потока от эшелетной поверхности.

Сравнение выражений (1) и (5) показывает, что в эшелетном резонаторе добротность становится ниже минимального дифракционного уровня при выполнении условия

$$\frac{1}{-\ln |R|} < \frac{L^2}{\lambda a}. \quad (6)$$

Если выполняется неравенство

$$\frac{\pi}{-\ln |R|} < \frac{L^2}{\lambda a}, \quad (7)$$

то резонансные свойства системы исчезают и обеспечивается возможность перестройки частоты без механического изменения геометрических размеров системы.

Ниже описывается гиротрон с резонатором эшелетного типа, имеющем добротность рабочей моды ниже минимальной дифракционной добротности. Согласно приведённым соотношениям, рабочая частота данного гиротрона должна перестраиваться в более широком диапазоне, чем рабочая частота гиротрона с цилиндрическим резонатором. Гиротрон исследовался в четырёхмиллиметровом диапазоне длин волн. Профиль резонатора показан на рис. 2. Его длина $L \approx 33,2$ мм, наименьший радиус $b_1 \approx 8$ мм, наибольший радиус $b_2 \approx 22,1$ мм. Профиль одного периода резонатора в более крупном масштабе изображён на рис. 3. Данный профиль согласно решению задачи о рассеянии плоской волны на плоской гофрированной поверхности [14] обеспечивал величину коэффициента $|R|$ порядка 0,9.

Из выражения (5) следует, что в эшелетном резонаторе добротность имеет расчётную величину $Q \approx 500$, что значительно ниже минимальной дифракционной добротности $Q \approx 900$. «Холодные» исследования эшелетной системы выявили наличие симметричной рабочей моды с добротностью $Q \approx 500 \div 700$ и азимутальным индексом $m = 0$ на частоте $\nu \approx 75,4$ ГГц (длина волны $\lambda \approx 3,98$ мм) и моды с добротностью $Q \approx 200 \div 400$ и азимутальным индексом $m = 2$ на частоте $\nu \approx 75,0$ ГГц (длина волны $\lambda \approx 4$ мм). Конструкция электронной пушки и коллектора гиротрона была аналогична использованной в [15]. Излучение выводилось через цилиндрический участок, следовавший непосредственно за резонатором. Выходное окно было рассчитано на длину волны $\lambda \approx 4$ мм. Гиротрон испытывался в импульсном режиме с частотой повторения импульсов $f = 5$ Гц и длительностью импульса $\tau = 70$ мс при силе тока катода $J = 5$ А и ускоряющем

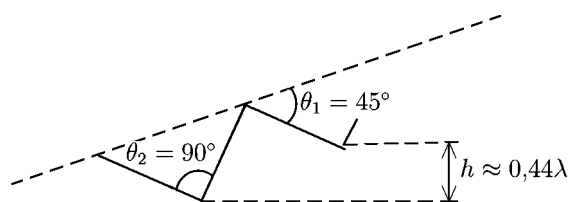


Рис. 3. Профиль одного зуба гофры, образующей резонатор

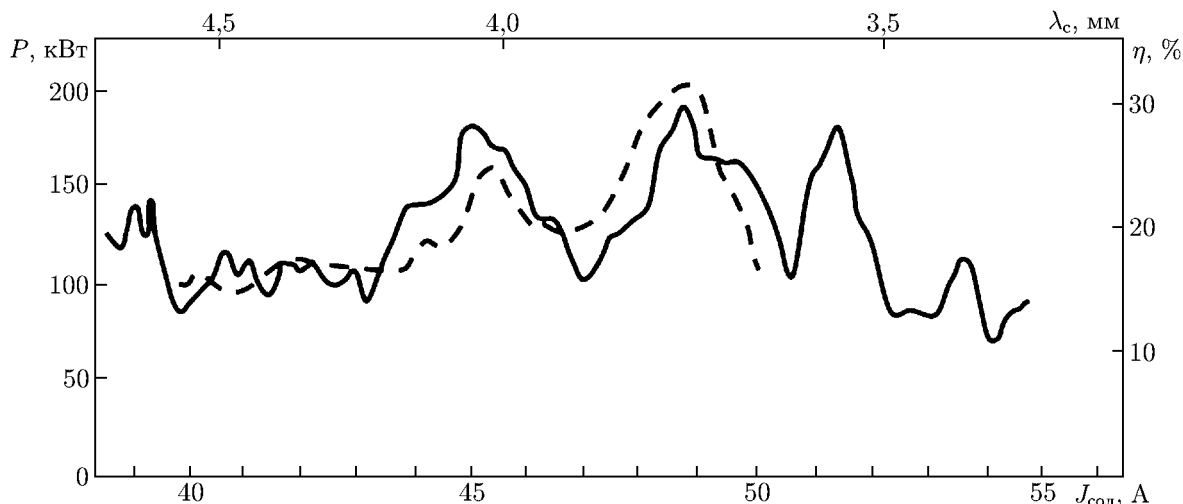


Рис. 4. Зависимость мощности и КПД гиротрона от тока соленоида и длины волны, отвечающей циклотронной частоте

напряжении $U = 65$ кВ. Результаты экспериментального исследования зависимости выходной мощности P и коэффициента полезного действия (КПД) η гиротрона от величины тока $J_{\text{сол}}$ в соленоиде, создающем рабочее магнитное поле, приведены на рис. 4. Для используемого соленоида связь между током $J_{\text{сол}}$ и длиной волны λ_c , соответствующей циклотронной частоте, даётся формулой [1, 15]

$$\lambda_c [\text{мм}] = \frac{107 [1 + U [\text{кВ}]/512]}{0,66 J_{\text{сол}} [\text{А}]}.$$

Кроме того, проводились измерения длины волны выходного излучения, которые дали следующие величины: 4,12; 3,95; 3,80 мм. Две кривые на рис. 4 соответствуют двум положениям гиротрона относительно центра соленоида, отличающимся на 5 мм.

Проводились также наблюдения структуры поля излучения на выходном окне гиротрона с помощью тепловизора. Структура поля на экране тепловизора при наблюдении на частоте вблизи частоты резонатора представляла собой ярко выраженную кольцевую картину. При перестройке частоты кольца смазывались и излучение представлялось в виде локализованного пятна в центре окна. Такая картина может быть объяснена как изменением поперечной структуры поля при прохождении окна вывода энергии на не расчётной длине волны, так и изменением поперечной структуры генерируемой моды.

Из приведённых результатов следует, что электронная перестройка частоты гиротронов возможна при снижении добротности рабочих мод ниже минимального дифракционного уровня, причём формула (4) завышает требуемую степень снижения. Эксперименты, описанные в [12] и в этой работе, показывают, что достаточно снизить в $1,5 \div 2$ раза добротность моды с $q = 1$ для достижения перестройки рабочей частоты гиротрона в широкой полосе. Эшелетные системы обеспечивают эту возможность без существенного снижения эффективности генерации в отличие от случая использования омических потерь для уменьшения добротности. В последнем случае большая часть мощности, отобранная от электронного пучка, идёт на нагрев стенок и не выводится из резонатора.

Автор благодарит рецензента за сообщение о статье [12]. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 11-02-00554, 13-02-00611).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Запевалов В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 8–9. С. 559.
2. Власов С. Н., Жислин Г. М., Орлова И. М. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1969. Т. 12, № 8. С. 1236.
3. Власов С. Н., Орлова И. М., Петелин М. И. // Гиротроны. Горький: ИПФАН, 1981. С. 62.
4. Антаков И. И., Власов С. Н., Гинцбург В. А. и др. // Электронная техника. I. Электроника СВЧ. 1975. Вып. 8. С. 20.
5. Власов С. Н., Лучинин А. Г., Нусинович Г. С. и др. // Гиротроны. Горький: ИПФАН, 1980. С. 160.
6. Братман В. Л., Денисов Г. Г., Самсонов С. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 2. С. 104.
7. Венедиктов Н. П., Запевалов В. Е., Куфтин А. Н. // Гиротроны. Горький: ИПФАН, 1989. С. 12.
8. Власов С. Н., Копосова Е. В., Павельев А. Б. и др. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17, № 4. С. 10.
9. Власов С. Н., Копосова Е. В., Павельев А. Б., Хижняк В. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39, № 6. С. 691.
10. Власов С. Н., Завольский Н. А., Запевалов В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 9. С. 716.
11. Братман В. Л., Моисеев М. А., Петелин М. И., Эрм Р. Э. // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 4. С. 622.
12. Torrezan A. C., Shapiro M. A., Sirigiri J. R., et al. // IEEE Trans. Electron. Dev. 2011. V. 58, No. 8. P. 2777.
13. Власов С. Н., Копосова Е. В. // ЖТФ. 1996. Т. 66, № 2. С. 156.
14. Власов С. Н., Копосова Е. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 3. С. 351.
15. Агапов Л. Н., Богданов С. Д., Власов С. Н. // Гиротроны. Горький: ИПФАН, 1980. С. 221.

Поступила в редакцию 9 апреля 2013 г.; принята в печать 11 июля 2013 г.

ELECTRON TUNING OF THE WORKING FREQUENCY OF THE GYROTRON WITH AN ECHELETTE STRUCTURE

*L. N. Agapov, S. D. Bogdanov, N. P. Venedictov, S. N. Vlasov, E. V. Kuposova, V. I. Kurbatov, and
E. A. Soluyanov*

We discuss the possibility of developing high-power gyrotrons with electric working-frequency tuning based on the use of echelette systems. In addition to high selective properties, such systems are capable of reducing Q-factors of modes till resonance properties disappear completely, while the structure of the electromagnetic field, which ensures effective interaction of the field with the electron beam, is retained. A gyrotron with an echelette cavity is described, in which the Q-factor of the working mode was below the minimum diffraction Q-factor, and the working frequency was tuned in a wide range.