

УДК 538.576 3 : 621 372.413

## КОАКСИАЛЬНЫЙ ОРОТРОН

Е. И. Нефёдов

Рассмотрена предложенная автором конструкция коаксиального оротрона — генератора дифракционного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Основу прибора составляет открытый резонатор с внешним цилиндрическим зеркалом и внутренним фокусирующим зеркалом в виде гиперboloида вращения. Дифракционная решетка наносится на цилиндрическое зеркало. Для возбуждения электромагнитных колебаний используется полый цилиндрический электронный поток. Вывод энергии волноводный или квазиоптический. Приведены данные расчета электронного КПД.

1. Проблема исследования и освоения волновых процессов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов поставила перед физикой и, в первую очередь, электроникой СВЧ задачу создания стабильных перестраиваемых генераторов колебаний, обладающих достаточно высокой выходной мощностью. Определенные задачи из этого цикла проблем успешно решаются и с помощью «классических» приборов СВЧ электроники (клизотроны, ЛБВ, ЛОВ и др.). Однако в силу ряда причин принципиального, конструктивного и технологического характера для применения более перспективными оказались приборы, в основу действия которых заложены два новых физических принципа: идея Франка о дифракционном излучении электрона, которая позднее была реализована в эффекте Смита—Парселла [1] (по существу — индуцированное черенковское излучение), и идея циклотронного резонанса в криволинейных электронных потоках, выдвинутая Гапоновым [2] (индуцированное циклотронное излучение, связанное с релятивистскими эффектами). На основании этих фундаментальных физических открытий в последние годы были предложены и реализованы два новых класса электронных приборов: гиromонотроны (мазеры на циклотронном резонансе) [2] и генераторы дифракционного излучения — оротроны [1, 3, 4]. В настоящей заметке обсуждается одна из возможных конструкций оротрона — коаксиальная [5].

В реализованных к настоящему времени конструкциях оротронов используются плоские дифракционные структуры и ленточные электронные потоки [6, 7]. Исключение составляет предложенное в [8] устройство, где применен коаксиальный открытый резонатор с бочкообразным внешним зеркалом. Более перспективным представляется оротрон [5] на основе открытого коаксиального резонатора с цилиндрическим внешним зеркалом и внутренним (фокусирующим) зеркалом в виде гиперboloида вращения [9].

2. Схема рассматриваемого прибора показана на рис. 1, где представлены два варианта оротрона: с волноводным (а) и квазиоптическим (дифракционным) выводом (б) энергии. Основу оротрона составляет открытый коаксиальный цилиндрический резонатор, состоящий из цилиндрического внешнего зеркала 1 с кольцевой дифракционной структурой 2. Внутреннее фокусирующее зеркало 3 представляет собой ги-

перболоид вращения, внутренняя полость которого — цилиндрический волновод — предназначена для вывода энергии (через щели 4) из резонатора. Кроме того, вывод энергии (в схеме а) можно осуществить через «прозрачную» дифракционную решетку 2, формируя диаграмму излучения с помощью кольцеобразной перископической системы 5; при этом зеркало 5 может производить коррекцию квазиоптического пучка 6. Полный электронный поток 7 создается кольцевой пушкой 8 (или системой пушек); отработанные электроны отводятся на коллектор 9. В схеме б) вывод энергии дифракционный (или квазиоптический) 10. Такой вывод предназначается для приборов коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов\*.

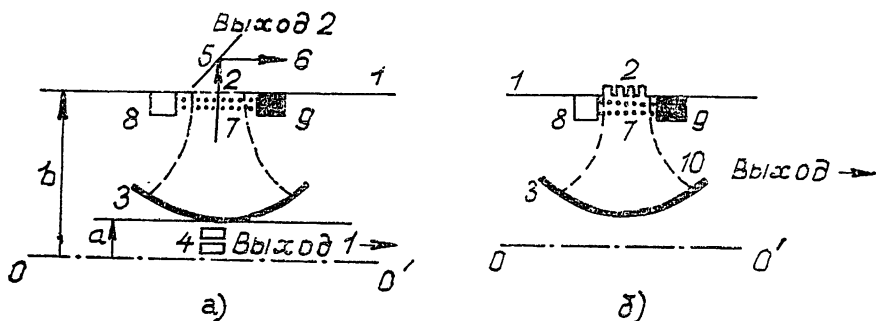


Рис. 1.

3. Размеры открытого резонатора оротрона таковы, что расстояние  $(b - a)$  между зеркалами 1 и 3 составляет несколько полуволн  $q \sim 10$ ;  $q = 1, 2, \dots$  [9]. Длина волны генерации приблизительно определяется так:  $\lambda = 2\pi/k \approx 2(b - a)/q$ . Таким образом, перестройка частоты в оротроне может происходить либо непрерывно за счет изменения расстояния между зеркалами 1 и 3\*\*, либо за счет «перескока» на другой тип колебаний (иное значение  $q$ ). В работе [9] было показано, что при  $ka \gg 1$  и отсутствии азимутальной зависимости полей ( $d/d\varphi \equiv 0$ ) открытый резонатор рассматриваемого типа с достаточно высокой степенью точности описывается своим двумерным аналогом\*\*\*.

В силу симметрии резонансной системы и электронного потока коаксиальный оротрон, по существу, представляет прибор, в котором взаимодействие полого электронного потока с дифракционной структурой локально (например, в плоскости рисунка) происходит так же, как и у безгранично широкого плоского потока с плоской дифракционной структурой. Стало быть, имея полный поток в коаксиальном оротроне, можно получить «чистые» волновые пучки дифракционного излучения, избежать возникновения пучков другой поляризации и других

\* Эффективность возбуждения линзовой и диафрагменной линий кольцевыми структурами (типа 5 и 10) обсуждалась в работе [10].

\*\* Непосредственное изменение расстояния  $(b - a)$  в схемах, показанных на рис. 1, исключено. Впрочем, незначительное изменение конструкции резонатора позволяет превратить его в перестраиваемый [11].

\*\*\* Измеренное значение частоты отличалось от расчетного на 0,01%, а добротность (в схеме а) составляла величину порядка 5000. При этом задача достижения максимальной добротности в исследованных в [9] резонаторах не ставилась.

явлений, обязанных конечной ширине электронного потока в плоском оротроне [7]\*.

4. Высказанные соображения о характере взаимодействия электромагнитного поля с электронным потоком в коаксиальном оротроне и результаты [9] позволяют при первоначальном анализе его свойств воспользоваться моделью неограниченно широкого потока в резонансных приборах *O*-типа [3, 12, 15]. Мы приведем здесь результаты расчета электронного КПД из решения нелинейного уравнения движения в приближении заданного поля открытого резонатора [15]. В отличие от [15] пренебрегаем влиянием пространственного заряда, но учтем распределение высокочастотного поля вдоль пространства взаимодействия:

$F \exp \{ - \hat{a} (\zeta - d)^2 \}$ , где нормированная амплитуда поля есть  $F = E/2 \beta_e u_0$ ,  $\beta_e = v/v_0$ ,  $\hat{a} = A \beta_e^{-2}$ , параметр расстройки  $\hat{b} = (v_0 - v_\phi)/v_\phi$ ,  $u_0$  — напряжение пучка,  $v_0$ ,  $v_\phi$  — скорости движения пучка и волны,  $d$  — нормированная эффективная длина пространства взаимодействия.

Для следующего набора параметров  $\hat{b} = 0,144$ ,  $\hat{a} = 0,00063$ ,  $d = 45,1$  и  $F = 0,019$  электронный КПД составляет величину 30%. При этом длина пространства взаимодействия оказывается порядка 7 длин замедленных волн. Следует отметить, что указанная величина КПД может быть увеличена\*\*.

5. Описанная конструкция коаксиального оротрона обладает рядом преимуществ. Основная его особенность заключается в существенно большей поверхности дифракционной решетки, у которой происходит взаимодействие электронного потока с высокочастотным полем, и, в силу этого, в возможности генерировать большие мощности. В коаксиальном оротроне используется кольцевой электронный поток, что предпочтительнее по сравнению с плоским потоком [12]. Волновые пучки дифракционного излучения являются однородными и однополяризованными и позволяют легко осуществить волноводный или квазиоптический вывод высокочастотной энергии из прибора (ср. [13]). Таким образом, электронный прибор непосредственно в линии возбуждает нужный тип колебаний, например, волну  $H_{01}$  цилиндрического волновода, симметричные волны в квазиоптических линиях передачи и т. п. Незначительное изменение конструкции прибора дает возможность получить перестройку по частоте в широком диапазоне. Коаксиальная конструкция прибора удобна для создания оптимального (по длине взаимодействия) магнитного поля, а также для осуществления (например, за счет скачков фазы) «возврата» в пространство взаимодействия выпавших из синхронизма электронов.

Отмеченные обстоятельства позволяют надеяться, что предложенный коаксиальный оротрон окажется перспективным для применения в физике и технике диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн.

В заключение автор считает своим исключительно приятным долгом выразить благодарность Б. М. Болотовскому, Б. З. Каценеленбауму,

\* Оценочные расчеты показали, что пусковой ток для первой азимутальной моды в два раза выше, чем для основного симметричного колебания. При этом не учитывалось изменение резонансной частоты несимметричного колебания по сравнению с рабочим типом. Эффект расщепления частот, возможно (при обеспечении высоких значений добротности резонатора), окажется полезным для подавления паразитных типов колебаний.

\*\* Как любезно сообщил автору В. К. Юлпатов, в расчетах, проведенных в НИРФИ (г. Горький), при длине пространства взаимодействия в 6 длин замедленных волн КПД был равен 33% (плоская модель оротрона)

В. И. Таланову, М. Б. Цейтлину и В. П. Шестопалову за внимание к работе и участие в ее обсуждении, а также В. К. Юлпатову за ценные замечания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Б. М. Болотовский, Г. В. Воскресенский, УФН, 88, № 2, 209 (1966); 94, № 3, 377 (1968).
2. А. В. Гапонов, А. Л. Гольденберг, Д. П. Григорьев, И. М. Орлова, Т. Б. Панкратова, М. И. Петелин, Листья в ЖЭТФ, 2, № 9, 430 (1965); А. В. Гапонов, М. И. Петелин, В. К. Юлпатов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 10, № 9—10, 1414 (1967).
3. Ф. С. Русин, Г. Д. Богомолов, в сб. Электроника больших мощностей, вып. 5, изд. Наука, М., 1968, стр. 45.
4. В. П. Шестопалов, Дифракционная электроника, Харьков, изд. ХГУ, 1976.
5. Е. И. Нефедов, Радиотехника и электроника, 22, № 9, 1327 (1977).
6. Ф. С. Русин, в сб. Электроника больших мощностей, вып. 5, изд. Наука, М., 1968, стр. 9.
7. А. С. Сысоев, О. А. Третьяков, В. П. Шестопалов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 17, № 7, 1075 (1974).
8. Н. Н. Суслов, В. П. Шестопалов, Авт. свид. № 347833 от 03.04.70 (Бюлл. откр., изобретений, 1972, № 24, стр. 173).
9. Е. И. Нефедов, И. М. Российский, А. Т. Фиалковский, А. М. Храпко, Радиотехника и электроника, 19, № 12, 2629 (1974).
10. Г. П. Веселков, Е. И. Нефедов, Квантовая электроника, 1, № 11, 2459 (1974).
11. Е. И. Нефедов, А. М. Храпко, Электронная техника, серия Электроника СВЧ, № 12, 114 (1974).
12. Л. А. Вайнштейн, В. А. Солнцев, Лекции по сверхвысокочастотной электронике, изд. Сов. радио, М., 1973.
13. С. Н. Власов, И. М. Орлова, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 17, № 1, 148 (1974).
14. А. А. Кураев, СВЧ приборы с периодическими электронными потоками, изд. Наука и техника, Минск, 1971.
15. А. И. Денисов, В. Е. Чайка, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 15, № 8, 1022 (1972).

Институт радиотехники и электроники  
АН СССР

Поступила в редакцию  
20 октября 1976 г.

## COAXIAL OROTRON

*E. I. Nefyodov*

The author suggests and considers the construction of a coaxial orotron — mm and submm diffraction radiation oscillator. On open resonator with an external focusing mirror as the hyperboloid of rotation is the basis of the device. The diffraction array is plot on the cylinder mirror. A full cylinder electron stream is used to excite electromagnetic oscillations. The energy output is waveguide or quasioptical. The calculation data of electron efficiency are given.