

УДК 621.385.69

ОРОТРОН ДИАПАЗОНА 300 -350 ГГЦ С ДВУМЯ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПОТОКАМИ

Е. А. Мясин, В. В. Евдокимов, А. Ю. Ильин

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, 141190, г. Фрязино МО, пл. акад. Введенского, д. 1

Статья поступила в редакцию 25 июня 2019 г.

Аннотация. Проведены эксперименты по выяснению возможности увеличения выходной мощности в оротроне субмиллиметрового диапазона с двухрядной периодической структурой (ДРПС) и открытым резонатором (ОР), образованным плоским и пятифокусным сфероцилиндрическим зеркалами, за счёт введения дополнительного электронного потока над вторым рядом ДРПС. Продольные оси 5-ти цилиндров фокусирующего зеркала расположены перпендикулярно направлению движения электронного потока. Показано, что такая возможность может быть реализована при соответствующей оптимизации коэффициента связи ОР с нагрузкой.

Ключевые слова: оротрон, субмиллиметровый диапазон, открытые резонаторы, многофокусные сфероцилиндрические зеркала, двухрядная периодическая структура.

Abstract: Experiments on output power increasing in submillimeter orotron with double-row periodic structure (DRPS) and 5-focus spherocylindrical mirror open resonator(OR) were carried out. Additional electron beam was introduced near the upper row of DRPS. The mirror 5-th cylinder axes were perpendicular to the beam direction. The positive results depend on optimal OR-load coupling.

Keywords: Orotron, submillimeter wavelength range, open resonators, multifocusing spherocylindrical mirrors, double-row periodic structure.

Введение

Освоению терагерцового диапазона частот (субмиллиметрового диапазона длин волн) в настоящее время посвящено множество работ, например [1-5]. В

работе [2] сообщалось о достижении выходной мощности порядка 70-30 мВт в оротроне в диапазоне частот 260-370 ГГц. В этой связи исследование возможности повышения мощности генерации оротрона с ДРПС при продвижении в этот диапазон представляет несомненный интерес.

1. Объекты исследований и методика эксперимента

Объектами исследования являлись экспериментальные макеты оротронов с ДРПС, создаваемые в вакуумной камере и работающие при непрерывной откачке. Основой этого прибора является ДРПС с периодом 0.182 мм высотой первого ряда $b_1 = 0.154$ мм, второго $b_2 = 0.147$ мм, высотой пролетного канала $2H = 0.1$ мм и общей высотой ПС $b_0 = 0.401$ мм [6]. Ширина плоского зеркала, на котором расположен первый ряд, равна 13мм, а длина 34мм. В макете прибора использовалось пятифокусное сфероцилиндрическое зеркало с параметрами: длина цилиндров - 4мм, с расположением образующей перпендикулярно продольной оси ДРПС. Таких цилиндрических поверхностей на длине зеркала в 34мм - пять, а расстояние между их фокусами 4.5мм. Методика эксперимента заключалась в следующем. Необходимо было провести эксперименты по перестройке прибора по частоте сначала с одним электронным потоком, проходящим внутри пролетного канала ДРПС, а затем с двумя, когда дополнительный электронный поток скользит по наружной стороне верхнего ряда ПС и сравнить результаты этих экспериментов. Для проведения экспериментов, прежде всего, была подготовлена электронно - оптическая система. Для этого был изготовлен анод с двумя щелями высотой по 0.1мм, который имел между ними переемычку ≤ 0.15 мм, приблизительно равной высоте второго ряда ДРПС $0.147\text{мм} \leq b_2 \leq 0.154\text{мм}$. Вся электронно-оптическая система: «нижняя» щель этого анода и пролётный канал ДРПС были юстированы с высокой точностью и обеспечивали 100% заполнение пролётного канала в экспериментах с одним электронным потоком при высоте катода 0.15мм (для уверенного заполнения основного пролётного канала между рядами b_1 и b_2). После проведения эксперимента по перестройке оротрона в диапазоне частот 260ГГц....350ГГц с одним электронным потоком,

вместо катода с высотой 0.15мм устанавливался катод с высотой 0.4мм, что обеспечивало заполнение током второй щели в аноде, и проводились эксперименты по перестройке оротрона в том же диапазоне частот. Сравнение результатов этих экспериментов позволяло оценить влияние второго электронного потока на величину генерируемой мощности.

2. Оценка влияния второго электронного потока на эффективность электронно-волнового взаимодействия и результаты экспериментов.

В работе [7] была выдвинута гипотеза о возможности увеличения эффективности электронно-волнового взаимодействия при введении в пространство взаимодействия оротрона с ДРПС второго электронного потока над вторым (верхним) рядом ДРПС, т.е. на высоте $\approx b_0$ над плоским зеркалом. Это предположение основывалось на том, что, если можно пренебречь толщиной пролётного канала $2H$ по сравнению с высотой рядов, то оротрон с ДРПС превращается в оротрон Ф.С. Русина с высотой «четвертьволновой гребёнки» b_0 . Известно, что в оротроне с «четвертьволновой гребёнкой» (поэтому она и получила такое название) имеет место четвертьволновый резонанс. В работе [8] получена формула для резонансной зависимости отношения амплитуды пространственной гармоники к амплитуде поля в резонаторе A_n/A_0 от b_0/λ , для ОР с двумя плоскими зеркалами, графическое изображение которой для первой, третьей и пятой пространственных гармоник приведены на Рис.1. Впервые оно было получено в работе [9].

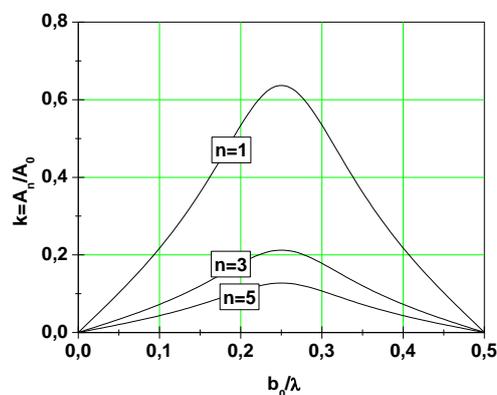


Рис. 1. Зависимость амплитуды пространственных гармоник от высоты ДРПС

Нас, прежде всего, интересует длина волны $\lambda = 0.88\text{мм}$ ($\approx 340\text{ГГц}$). Для неё A_1/A_0 для $b_0/\lambda = 0.4/0.88 = 0.4545$, что определяет величину $A_1/A_0 \sim 0.1$. Следует также учесть увеличение амплитуды поля за счёт резонанса в \sqrt{Q} . Кроме того, величина электрической составляющей ВЧ поля уменьшается при удалении от верхнего ряда ДРПС по закону $\exp(-2\pi x/l)$. Расчёт даёт: $x = 0.1x_1 = 0.0182\text{мм}$, $\exp(-2\pi x/l) = 0.5326$; $x = 0.2x_1 = 0.0364\text{мм}$, $\exp(-2\pi x/l) = 0.285$; $x = 0.3x_1 = 0.0546\text{мм}$, $\exp(-2\pi x/l) = 0.152$; $x = 0.5x_1 = 0.091\text{мм}$, $\exp(-2\pi x/l) = 0.021$. Как следует из расчёта, эффективно «работает» тонкий слой электронного потока $\Delta \leq 0.025\text{мм}$. Поэтому чрезвычайно важно, чтобы высота верхнего ряда ДРПС была несколько (хотя бы на 0.02мм) выше, чем высота перемычки в аноде. Как показали эксперименты в «горячем» режиме работы, это условие выполняется.

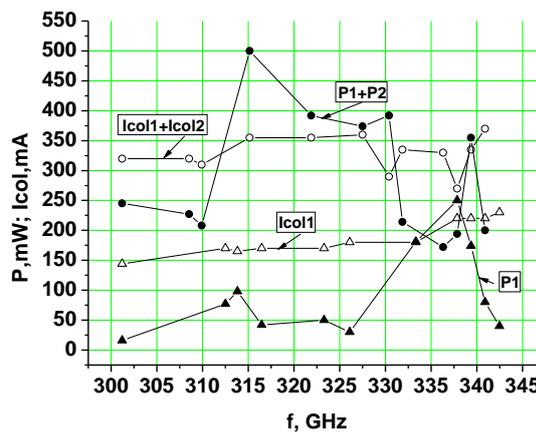


Рис.2. Зависимость выходной мощности оротрона с одним (P1) и с двумя (P1+P2) электронными потоками от тока при перестройке частоты

На Рис. 2 показаны экспериментальные результаты по перестройке оротрона с одним и двумя электронными потоками. Кривые I_{col1} , $P1$ соответствуют значениям тока на коллектор и выходной мощности в оротроне с одним электронным потоком, а кривые $I_{col1} + I_{col2}$, $P1 + P2$ – в оротроне с двумя потоками. При этом степень связи ОР-нагрузка, соответствовал параметру $D=3$ мм в случае, когда суммарный ток двух потоков превышал ток одного потока примерно в 2 раза. Видно, что влияние второго (дополнительного) электронного потока на увеличение выходной мощности более заметно в диапазоне 310 – 330 ГГц, в котором связь ОР – нагрузка для оротрона с одним

потоком была неоптимальной. В диапазоне 332 -337 ГГц, когда эта связь была оптимальной в оротроне с одним потоком, мы наблюдаем резкий спад выходной мощности в оротроне с двумя потоками. После того, как был пройден режим оптимальной связи с нагрузкой для оротрона с одним электронным потоком, на частоте 340 ГГц наблюдается небольшой подъем, с выходной мощностью, превышающей её для этого оротрона.

Заключение

На основе результатов проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что введение второго электронного потока над вторым рядом ДРПС является достаточно простым и эффективным способом увеличения мощности генерации в оротроне субмиллиметрового диапазона длин волн при использовании открытого резонатора (ОР) с многофокусным сфероцилиндрическим зеркалом. Однако для получения этого эффекта необходим поиск оптимальной связи ОР с нагрузкой, так как при увеличении «рабочего» тока за счёт введения в пространство взаимодействия прибора дополнительного электронного потока оптимальная связь ОР с нагрузкой изменяется.

Авторы благодарят Б.Ч. Дюбуа и Т.А. Батькову за изготовление катодов для экспериментальных макетов оротрона и Ю.Н. Казанцева за предоставление разработанного им интерферометра для измерения частоты.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Отделения физических наук Российской академии наук (программа “Современные проблемы радиофизики”).

Литература

1. Ерёмка В. Д., Кураев А. А., Сеницын А. К. Орботроны – многопучковые генераторы миллиметровых и субмиллиметровых волн // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2004): материалы 14-й Междунар.Крым. конф. Севастополь, 2004. С. 199-202.

2. Братман В. Л., Гинцбург В. А., Гришин Ю. А., Думеш В. С., Русин Ф. С., Федотов А. Э. Импульсные широкодиапазонные оротроны миллиметровых и субмиллиметровых волн // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т 49. №11. С. 958-963.
3. Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А., Седов А.С. Численное моделирование непрерывных субмиллиметровых гиротронов на второй гармонике циклотронной частоты // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2009, Т.52, №5-6. С.408-417
4. Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А., Седов А.С. Исследование субтерагерцовых гиротронов для ДПЯ спектроскопии в ИПФ РАН // Изв. ВУЗов ПНД, 2012, Т. 20, №3. С.70-80.
5. Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю. Экспериментальные исследования возможности генерации излучения на частоте до 400 ГГц в оротроне с двухрядной периодической структурой // Известия вузов. Радиофизика, 2016. Том 59, № 5, с.409-422
6. Мясин Е.А. Оротрон // Патент РФ № 2634304. Патентообладатель ФГБУН им. В.А.Котельникова РАН. Приоритет от 10.06.2016. Дата Гос. Рег. 25.10.2017
7. Мясин Е.А., Ильин А.Ю., Евдокимов В.В. // Тез. Докл Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. 12-15 марта 2009 г., Нижний Новгород. С.45.
8. Русин Ф.С., Богомоллов Г.Д. // Электроника больших мощностей. Москва. Изд-во «Наука». 1968. Вып.5. С. 38
9. Мясин Е.А. Оротрон – мощный резонансный генератор О-типа сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. // Радиотехника. 2004. №2. С.22

Для цитирования:

Е. А. Мясин, В. В. Евдокимов, А. Ю. Ильин. Оротрон диапазона 300-350 ГГц с двумя электронными потоками. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul19/7/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.7.7