

DOI 10.30898/1684-1719.2020.2.9

УДК 621.391, 621.396

ОРОТРОН С ДВУХРЯДНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

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

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова
РАН, 141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. Введенского, д.1

Статья поступила в редакцию 5 февраля 2020 г.

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования оротрона с двухрядной периодической структурой (ДРПС) и 7-и фокусным сфероцилиндрическим фокусирующим зеркалом открытого резонатора (ОР) с целью получения генерации с высоким уровнем импульсной мощности (порядка десятков ватт) в диапазоне частот 215 - 230 ГГц ($\lambda = 1.5 - 1.3$ мм). Проведен теоретический анализ эффективного режима генерации в этом оротроне, подтвердивший возможность трансформации свойств ОР с ДРПС при определённых размерах её высоты относительно длины волны генерации.

Ключевые слова: оротрон, открытый резонатор, многофокусные сфероцилиндрические зеркала, двухрядная периодическая структура.

Abstract. Experimental results of two-row periodic structure (TRPS) orotron investigations are presented. The 7-th focus spherocylindrical mirror is used in open resonator in order to generate the high level output pulse power (tenths of Watts) in 215 – 230 GHz frequency range. The theoretical analysis of effective generation regimes in this orotron configuration confirmed the possibility of OR with TRPS properties transformation in specific TRPS height to wavelength relations.

Key words: orotron, open resonator, multi focus spherocylindrical mirrors, two-row periodic structure.

Введение

В данной работе экспериментально исследованы различные режимы генерации в оротроне с «длинной» ДРПС ($\gg 5r_k$ - радиусов каустики) при изменении коэффициента связи с открытым резонатором (ОР). Целью

экспериментов было получение в диапазоне 215 – 230 ГГц ($\lambda = 1.5 - 1.3$ мм) генерации с уровнем выходной мощности в импульсном режиме порядка десятков Ватт.

1. Экспериментальные результаты

В ОР использовалось 7-ми фокусное сфероцилиндрическое зеркало с радиусом кривизны 32 мм цилиндра и сферы и общей длиной 34.2 мм при длине 4 мм каждого из 7-ми цилиндров с образующими, перпендикулярными электронному потоку. На рисунке 1 изображена схематически конструкция оротрона с двухрядной периодической структурой (ДПРС) и фокусирующим многофокусным сфероцилиндрическим зеркалом.

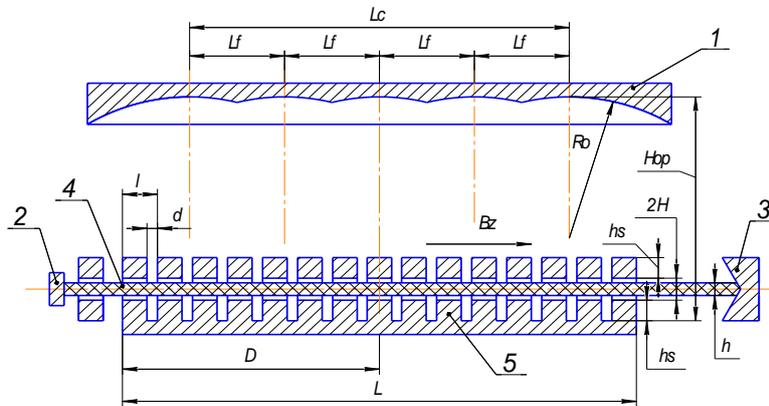


Рис.1 - Схема конструкции оротрона с фокусирующим многофокусным зеркалом.

Здесь 1 – многофокусное фокусирующее зеркало ОР с числом фокусов $N_f = 5$, 2 – электронная пушка, 3 – коллектор, 4 - электронный поток, толщиной h , 5 – плоское зеркало, на котором расположена ДПРС с периодом l , щелью d между выступами, и с расстоянием между рядами $2H$ для пролёта электронов. ДПРС занимает всю поверхность плоского зеркала. Расстояние между зеркалами – H_{OP} . Фокусирующее магнитное поле B_z направлено вдоль оси Z . Вывод ВЧ энергии из ОР (на Рис.1 не показан), центральная ось которого расположена на расстоянии D от положения последнего от анода фокуса фокусирующего зеркала, производится через отверстие в плоском зеркале 0.8×2.4 мм². Поэтому изменение коэффициента связи ОР с нагрузкой осуществляется сдвигом фокусирующего зеркала вдоль пространства

взаимодействия. При приближении максимума экспоненциального спада ВЧ поля в ОР к выводу энергии ВЧ мощность, поступающая в нагрузку, увеличивается, при удалении – уменьшается.

В экспериментах использовалась ДРПС с периодом $l = 0.29$ мм и длиной $L_0 = 33$ мм. Высота нижнего ряда ДРПС, расположенного на плоском зеркале, $b_1 = 0.25$ мм, высота верхнего – $b_2 = 0.13$ мм, высота пролётного канала $2H = 0.1$ мм, поэтому полная высота ДРПС $b_0 = b_1 + 2H + b_2 = 0.48$ мм. ДРПС была выполнена из меди электроэрозионным способом [1]. Таким образом, для длины волны 1.3 мм, ДРПС имела высоту меньше $\lambda/2$ (0.65 мм), но больше, чем $\lambda/4$ (0.325 мм). Такая ДРПС в работе [2] была названа «промежуточной».

Использование в ОР 7-ми фокусного сфероцилиндрического зеркала с 7-ю пересекающимися сфероцилиндрическими поверхностями при расстоянии между их фокусными плоскостями (фокусами) 3.2 мм, перпендикулярными плоскому электронному потоку и длинами цилиндрической части в 4 мм, позволило практически не учитывать неоднородность ВЧ поля по ширине (5.3 мм) электронного потока. Эти цилиндрические участки обеспечивают выравнивание распределения ВЧ поля в ОР по ширине плоского электронного потока, и, таким образом, сдвигают экспоненциальное уменьшение амплитуды ВЧ поля сферическими участками зеркала к его краям. В результате неоднородностью ВЧ поля по ширине электронного потока можно пренебречь. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность эффективного взаимодействия с ВЧ полем плоского электронного потока по всей его ширине.

При использовании ОР с 7-ми фокусным сфероцилиндрическим зеркалом при оптимальной связи с нагрузкой на частоте ≈ 190 ГГц была достигнута мощность 20 Вт. Максимальная мощность в 20 Ватт была получена на более низкой частоте, чем предполагалось до начала экспериментов. Как следует из работы [2], это связано с отклонением размеров высоты ДРПС b_0 от требуемой высоты.

Результаты проведенных экспериментов представлены на Рис.2.

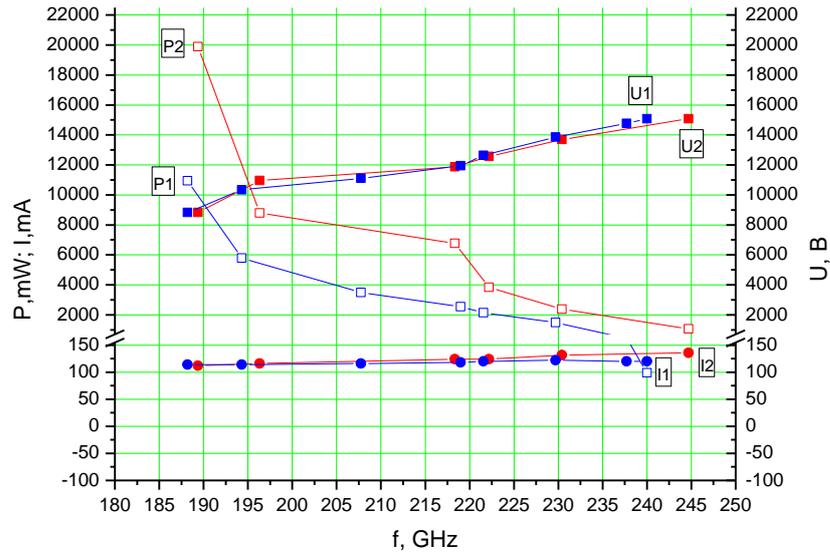


Рис. 2. Зависимость выходной мощности (P1,P2), тока пучка (I1,I2), напряжения (U1, U2) от частоты при разной величине связи (D_1, D_2) ОР с нагрузкой в оротроне с 7-ми фокусным сфероцилиндрическим фокусирующим зеркалом: $D_1=3$ мм, $D_2=2.5$ мм

Как видно на Рис.2, генерируемая прибором ВЧ мощность резко нарастает с уменьшением частоты. Причиной такой зависимости является, как будет показано позднее, обнаруженное в [2] неизвестное ранее свойство ДРПС изменять характер распределения ВЧ поля по высоте ОР, вдоль оси, перпендикулярной плоскому зеркалу.

Как показано в работе [2], при значении $b_0/\lambda \approx 0.3 - 0.32$ отношения высоты «промежуточной» ДРПС к длине волны она приобретает свойства четвертьволновой однорядной периодической структуры («четвертьволновой гребёнки»).

Тот факт, что резонансное увеличение ВЧ мощности на частоте ≈ 190 ГГц связано именно с неизвестным ранее свойством ДРПС, был подтверждён проведенным анализом КПД оротрона с 7-ми фокусным зеркалом по «Программе расчёта» [3].

2. Самосогласованное решение уравнений нелинейной теории электронно-волнового взаимодействия

«Программа расчёта» [3] была первоначально разработана для численного решения системы уравнений [4] нелинейной теории электронно-волнового взаимодействия в оротроне с двух зеркальным ОР, образованным плоским и **однофокусным сферическим фокусирующим** зеркалом.

Самосогласованное решение нелинейной теории электронно-волнового взаимодействия в оротроне получается в результате совместного решения системы уравнений: 1) нелинейного уравнения движения и уравнения возбуждения, а также решения 2) уравнения обмена энергией электронного потока и высокочастотного (ВЧ) поля в ОР прибора. Самосогласованное решение задачи может быть представлено как точка пересечения двух графиков: 1) зависимости электронного КПД $\eta_{e-1}(F_0)$, от безразмерной напряжённости ВЧ поля F_0 , полученной в результате решения нелинейного уравнения движения и уравнения возбуждения и 2) зависимости электронного КПД $\eta_{e-2}(F_0)$, полученного в результате решения уравнения обмена энергией в ОР. Эти уравнения нелинейной теории работы [4] были решены в среде Matlab [3] с помощью созданной «Программы расчёта».

Результат вычислений представлялся графически в виде двух функций, соответственно $\eta_{e-1}(F_0)$ и $\eta_{e-2}(F_0)$, а точки их пересечения вычислялись численно путем нахождения нулей разностной функции $\eta_{e-1}(F_0) - \eta_{e-2}(F_0)$. Первоначально они определяли режим стационарной генерации в оротроне с ОР с **однофокусным сферическим фокусирующим** зеркалом, исследовавшимся в работе [4].

Полученные уравнения могут быть использованы и для оротрона с более сложным типом ОР, например, таким, которое было использовано в данном эксперименте. Для этого при вычислении $\eta_{e-1}(F_0)$ необходимо было заменить функцию $f(y) = \exp[-m^2(y-0.5)^2]$, определяющую распределение продольного ВЧ электрического поля для однофокусного сферического фокусирующего зеркала, в уравнении для $\eta_{e-1}(F_0)$ на новую. В рассматриваемом случае

орotronа с 7-и фокусным сфероцилиндрическим зеркалом эту функцию нужно заменить на функцию для многофокусного сфероцилиндрического зеркала с образующей цилиндра поперёк электронного потока, представляющую собой сумму экспонент с расположением фокусов в соответствии с заданным расстоянием d_ϕ между ними:

$$f_1(y) = \exp[-m^2(y-y_0)^2] + \sum_p \exp[-m^2(y-pd_\phi/L_0)^2], \text{ где } p=2\dots6. \quad (1)$$

Определив положения фокусов зеркала от его анодного края при $D = 2.5\text{мм}$ и проведя их нормировку на длину взаимодействия $L_0 = 19.2\text{мм} + 5 r_k = 32.6\text{мм} \approx 33\text{мм}$, где r_k – радиус каустики на плоском зеркале ОР, можно задать функцию распределения ВЧ поля вдоль пространства взаимодействия в соответствии с выражением (1).

В связи с изменением геометрии ОР орotronа формула для $\eta_{e_2}(F_0)$ также должна быть соответствующим образом изменена, так как изменились объём и поверхность зеркал ОР и, следовательно, запасённая в нём энергия основного типа колебаний.

Для ОР с однофокусным сферическим фокусирующим зеркалом в формуле для КПД ОР $\eta_{e_2}(F_0)$ величина этой энергии (норма колебаний) определяется коэффициентом 135. Поэтому если известна норма колебаний для ОР с более сложным фокусирующим зеркалом (вычисленная каким либо способом), то сравнив её величину с нормой колебаний в ОР с однофокусным сферическим фокусирующим зеркалом, можно определить множитель, на который нужно умножить коэффициент 135 в формуле для $\eta_{e_2}(F_0)$. Норма колебаний для однофокусного сферического зеркала вычисляется аналитически и составляет $N = 3.47(10^{-12})H_{OP}r_k^2$.

Определить норму колебаний в ОР с 7-ми фокусным сфероцилиндрическим фокусирующим зеркалом позволяют расчёты электродинамических характеристик (ЭДХ), проведенные по аналогии с работой [6] с использованием программного комплекса CST Microwave Studio [7]. Для этого ОР и расстояний между его зеркалами $H_{OP} = n(\lambda/2)$ при $n = 5\dots11$

были исследованы следующие параметры: резонансные частоты - f_0 , добротности колебаний - Q_0 , нормы колебаний N_r , относительная мощность потерь $P/W=2\pi f_0/Q_0$. Последнее значение $H_{OP} = 11(\lambda/2)$ соответствует экспериментальному значению расстояния между зеркалами. Вычисленное значение нормы колебаний для этой высоты и частоты 190.5 ГГц есть $N_{сфц7} = 50.156(10^{-20})$. Полагая, что для частоты 190ГГц норма колебаний не должна практически отличаться от $N_{сфц7} = 50.156(10^{-20})$ для частоты 190,5ГГц, будем использовать это её значение для дальнейших расчётов.

Одновременно были исследованы анимационные картины E - компоненты ВЧ поля и распределения его по трём осям координат для каждого значения n .

Для дальнейшего расчёта КПД и выходной мощности оротрона необходимо было сравнить норму колебаний в ОР с 7-ми фокусным сфероцилиндрическим фокусирующим зеркалом и норму колебаний в ОР с однофокусным сферическим зеркалом, которая, может быть вычислена аналитически по формуле $N_{сфл} = 3.47(10^{-12}) H_{OP} r_k^2$. Подставляя в формулу экспериментальные значения $H_{OP} = 8.583\text{мм}$, $r_k^2 \approx 7.11$ имеем $N_{сфл} \approx 21.18(10^{-20})$.

Так как $N_{сфц7} = 50.1569(10^{-20})$, то коэффициент для увеличения нормы колебаний в формуле для η_{e_2} составил величину $K = N_{сфц7}/N_{сфл} = 50.156/21.18 \approx 2.37$.

Далее из результатов эксперимента были взяты исходные данные для расчёта: $U = 9000\text{В}$, $I = 0.1\text{А}$, $\lambda \approx 1.58\text{мм}$ (190ГГц), $r_k = 2.68\text{мм}$, $D = 2.5\text{мм}$ – расстояние последнего фокуса 7-ми фокусного зеркала от центра отверстия вывода энергии в плоском зеркале. Безразмерные величины, полученные из исходных данных и используемые в расчёте по «Программе расчёта», выделены жирным шрифтом. $D/r_k = 2.5/2.68 = \mathbf{0.93}$, $n_\phi = \lambda/l = 1.58/0.182 = \mathbf{5.448}$, $n_e = 505/U^{0.5} = 5.323$, $b = n_\phi/n_e - 1 = \mathbf{0.0235}$, $L_0 = 33\text{мм}$ – длина взаимодействия, $m = L_0/r_k = 33/2.68 = \mathbf{12.3}$, $a = r_k/\lambda = 2.68/1.58 = \mathbf{1.72}$, число полуволн между зеркалами $n = 2H_{OP}/\lambda = \mathbf{11}$, безразмерная длина взаимодействия $L = 2\pi/\lambda (n_e L_0) = \mathbf{698.2}$.

Таким образом, имеем: $L = 698.2$, $m = 12.3$, $b = 0.0235$ и с учётом того, что $b_0/\lambda \approx 0.3$, $\chi = E_1/E_0 = 0.5$, где E_1 и E_0 – амплитуда ВЧ поля рабочей гармоники ВЧ поля в ОР соответственно, ток $I = 0.1$, нагруженная добротность в тысячах $q = 2 \dots 5$ ($1000q = Q_n$), $n = 11$, $\alpha = 1.72$, $\eta_{e-2} \propto 135 K = 135 \times 2.37 = 319.95 \approx 320$ (здесь выделенные параметры не изменяются). Результаты счёта для нагруженной добротности $q = 5$ приведены на Рис. 3, а для $q = 2$ на Рис.4.

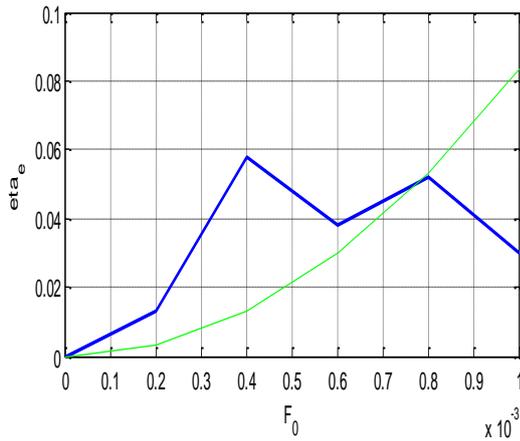


Рис. 3

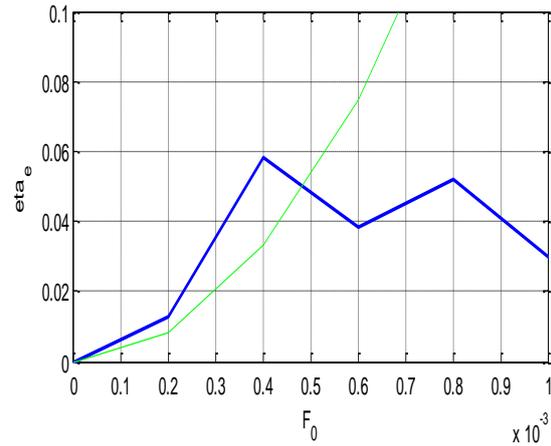


Рис. 4

Из сравнения Рис.3 и Рис. 4 следует, что электронный КПД η_e как в одном случае $\eta_{e-1} \approx 0.05$ при $q = 2$, так и в другом - $\eta_{e-1} \approx 0.05$ при $q = 5$. Это, в свою очередь, означает, что при $q = 2$ существенно возрастает КПД ОР $\eta_{OP} = 1 - Q_n/Q_0$ (Q_n , Q_0 - нагруженная и собственная добротность ОР соответственно) и, как следствие, полный КПД оротрона $\eta = \eta_{e-1} \eta_{OP}$, так как ВЧ мощность в нагрузке $P = UI\eta = UI(\eta_{e-1}) \eta_{OP} = UI\eta_{e-1} (1 - Q_n/Q_0)$, то возрастает и ВЧ мощность. Поскольку ДРПС ведёт себя в этом режиме как «четвертьволновая гребёнка», то следует Q_0 определить согласно [5]: $Q_0 = H_{OP}/\delta(3 + \lambda/l) = 6535.6$, где $\delta = \sqrt{f}/66$ – учёт омических потерь ВЧ энергии в скин - слое. Отсюда при $q = 2$ будем иметь $Q_n = 2000$ и КПД ОР $\eta_{OP} = 1 - Q_n/Q_0 = 0.6939$.

Таким образом, для $q = 2$ КПД в нагрузке $\eta_1 = (\eta_{e-1}) \eta_{OP} \approx 0.035$, а при $q = 5$ - КПД ОР $\eta_{OP} = 1 - Q_n/Q_0 \approx 0.235$, КПД в нагрузке $\eta_2 = (\eta_{e-1}) \eta_{OP} \approx (0.05)0.235 = 0.01175 \approx 0.012$.

Теперь определим мощность в нагрузке для нагруженной добротности при $q = 5$ и при $q = 2$. В первом случае $P_{BЧ} = UI(\eta_1) = 9000 \times 0.1 \times 0.012 = 10.8 \approx 10.8 \text{ Вт}$, во втором случае $P_{BЧ} = UI(\eta_2) = 9000 \times 0.1 \times 0.035 = 31.5 \text{ Вт}$. Эти результаты получены при условии, что омические потери в ОР подчиняются закону нормального скин - эффекта.

И, так как мы не можем измерять собственную и нагруженную добротность ОР, то возможны два варианта объяснения отличия экспериментального результата от расчёта.

Во-первых, нагруженная добротность может быть $2 < q_n < 5$, что вполне возможно. Определить её величину просто. Так как $P_{BЧ} = UI\eta_n = 9000 \times 0.1 \times (\eta_{e-1})\eta_{OP}$, то, подставляя экспериментальные значения $P_{BЧ} = 20 \text{ Вт}$ и $\eta_{e-1} = 0.05$, будем иметь $\eta_{OP} = 20 / (900 \times 0.05) = 0.44$. Так как $\eta_{OP} = 1 - Q_n / Q_0 = 1 - q_n / q_0$, то $q_n = (\eta_{OP} - 1) \times q_0 \approx 0.56 \times 6.536 \approx 3.63$ или $Q_n = 3630$.

Во-вторых, в коротковолновой части миллиметрового диапазона потери могут существенно отличаться от минимальных, обусловленных только скин-эффектом.

Если бы эта ДРПС была по своим свойствам «полуволновой», то максимальное значение χ могло быть не больше $\chi \leq 0.3$. Тогда можно показать, что минимальная нагруженная добротность практически не может быть меньше, чем $q_n = 4$, так как в противном случае не существует единственного самосогласованного решения и зависимости КПД пересекаются в нескольких точках. При $q_n = 3$ две зависимости КПД не пересекутся, и решение не существует.

В итоге можно считать, что результаты расчёта и эксперимента достаточно хорошо согласуются друг с другом при учёте неизвестного ранее свойства ДРПС.

3. Выводы

Проведено экспериментальное исследование работы в импульсном режиме оротрона с двухрядной периодической структурой и двух зеркальным открытым резонатором с плоским и 7-и фокусным фокусирующим зеркалом в

коротковолновой части миллиметрового диапазона. Зафиксирован резкий рост генерируемой ВЧ мощности при увеличении длины волны, которая достигает максимума на частоте 190 ГГц, и при этом b_0/λ становится ≈ 0.3 .

Анализ экспериментальных результатов показал, что рост ВЧ мощности с ростом длины волны генерируемых колебаний в оротроне связан с особыми свойствами «промежуточной» ДРПС при уменьшении отношения b_0/λ [2]. Это, в свою очередь, означает, что в ОР должен иметь место $\lambda/4$ резонанс, обеспечивающий увеличение эффективности электронно – волнового взаимодействия в оротроне, т.е. «промежуточная» ДРПС «может вести себя» как полуволновая ДРПС с $b_0 = \lambda/2$ или как «четвертьволновая гребёнка» с $b_0 = \lambda/4$ [2]. Таким образом, в данном эксперименте был подтверждён вывод, сделанный в теоретической работе [2].

Следует также обратить внимание на то, что выходная мощность в 20Вт и КПД в нагрузке, который достигает $\approx 2.2\%$ ($U = 9000\text{В}$, $I = 0.1\text{А}$), при длине волны $\lambda \approx 1.58\text{мм}$ (на частоте ≈ 190 ГГц) для оротрона с ДРПС является важным результатом. Он позволяет надеяться на возможность существенного увеличения мощности оротрона с ДРПС на более коротких длинах волн, например, на $\lambda = 1.0$ мм.

Литература

1. 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
2. Myasin E.A., Solov`ev A.N. Unknown peculiarity of the orotron two row periodic structure. // 3rd Intern. Conf. “Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications”. Tera-2018, Nizhny Novgorod, Russia, October 22-25, 2018. Program Conf. P.1.9
3. Андреев Ю.В., Мясин Е.А. Программа расчёта для вычисления электронного КПД оротрона с однорядной или двухрядной периодической структурой на плоском зеркале открытого резонатора с фокусирующими зеркалами различной

геометрии // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016613929. Заявка № 2016611291 от 17 февраля 2016 г. Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11 апреля 2016.

4. Цейтлин М.Б., Мясин Е.А., Нутович Л.М. Оптимизация параметров оротрона на основе приближенной аналитической теории // Радиотехника и электроника. 1989. Т.33. №3. С. 580-584.
5. Русин Ф.С., Богомолов Г.Д. Колебательная система оротрона. // Электроника больших мощностей. Сб.5. С.38 «Наука». Москва, 1968.
6. Мясин Е.А., Соловьёв А.Н. Анализ электродинамических характеристик открытых резонаторов с фокусирующими многофокусными сферическими зеркалами и тремя типами периодических структур на плоском зеркале при длине волны 1мм // Радиотехника и электроника. 2018.Т.63. №7. Стр. 670 – 677
7. Курушин А.А., Пластиков А.Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. // М. Издательство МЭИ, 2010, 160 стр.

Для цитирования:

Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю., Соловьёв А.Н. Оротрон с двухрядной периодической структурой коротковолновой части миллиметрового диапазона. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb20/9/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.2.9