

## ОБ ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ ОТКРЫТОГО РЕЗОНАТОРА ОРОТРОНА С ДВУХРЯДНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

© 2021 г. Е. А. Мясин<sup>а</sup>, \*, А. Н. Соловьев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

\*E-mail: eam168@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 31.10.2019 г.

После доработки 13.07.2020 г.

Принята к публикации 10.02.2021 г.

Исследованы электродинамические характеристики (ЭДХ) открытых резонаторов (ОР), образованных многофокусным сферическим и плоским зеркалами с использованием на плоских зеркалах периодических структур: однорядной – “четвертьволновой гребенки”, у которой высота ламели  $h_s = \lambda/4$ , или двухрядной (ДРПС) “полуволновой” при  $h_s = \lambda/2$  и “промежуточной” при  $\lambda/4 < h_s < \lambda/2$  ( $\lambda$  – длина волны) – и проведено сравнение этих ЭДХ. Показано, что в ОР с “промежуточной” ДРПС имеет место неизвестная ранее особенность распределения высокочастотного поля основного типа колебания по оси симметрии ОР. Использование в оротроне ОР с “промежуточной” ДРПС при  $h_s/\lambda < 0.3 \dots 0.32$  обеспечивает возможность увеличения эффективности электронно-волнового взаимодействия и, как следствие, увеличение КПД и генерируемой мощности. Приведены результаты эксперимента и расчета, подтверждающего это.

DOI: 10.31857/S0033849421070093

### ВВЕДЕНИЕ

Для продвижения оротрона с двухрядной периодической структурой (ДРПС) в субтерагерцовый диапазон приходится увеличивать длину электронно-волнового взаимодействия, что влечет за собой поиск конструкций открытых резонаторов, способных обеспечить необходимое распределение высокочастотного (ВЧ) поля основного типа колебаний в ОР. Исследование ВЧ-полей в одном из вариантов такого резонатора [1] приведено в данной работе.

### 1. КОНСТРУКЦИЯ ОРОТРОНА С ДВУХРЯДНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ И УВЕЛИЧЕННОЙ ДЛИНОЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

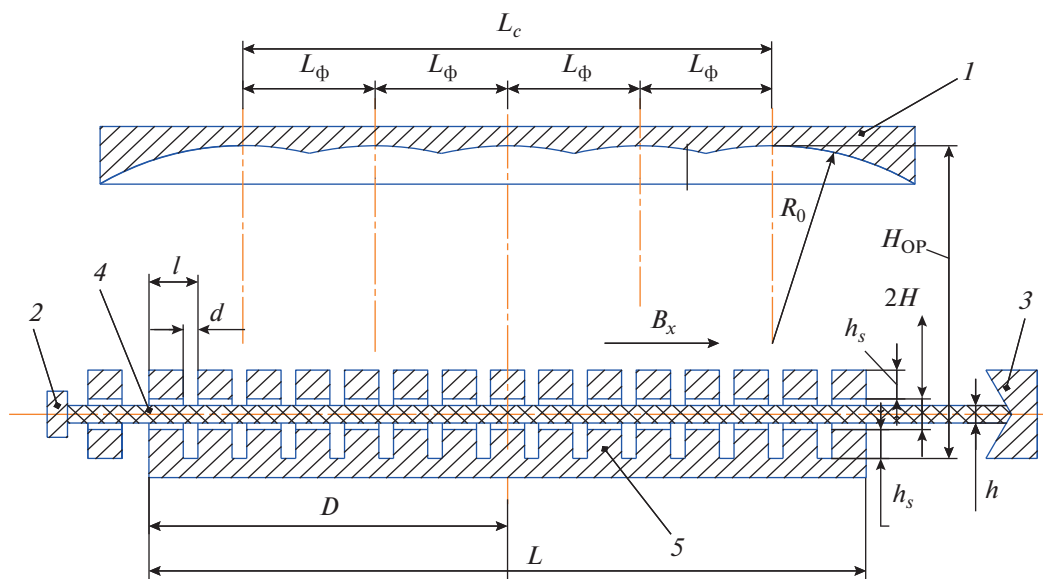
Схема конструкции оротрона с фокусирующим многофокусным сферическим зеркалом 1 (число фокусов  $N_\phi = 5$ ) представлена на рис. 1. Зеркало выполнено в виде пересекающихся сферических поверхностей с одинаковым радиусом  $R_0$ . Расстояние между осями симметрии этих поверхностей выбрано так, чтобы обеспечивать вдоль движения электронного потока гауссово распределение ВЧ-поля в начале области взаимодействия, затем сформировать распределение ВЧ-поля, близ-

кое к однородному распределению, и вновь – гауссово распределение ВЧ-поля в конце области взаимодействия. В конструкцию ОР входят также электронная пушка 2, коллектор 3, электронный поток 4 толщиной  $h$ , плоское зеркало 5, на котором расположена ДРПС с периодом  $l$ , щелью  $d$  между выступами и с расстоянием между рядами  $2H$  для пролета электронов. ДРПС занимает всю поверхность плоского зеркала. Расстояние между зеркалами  $H_{OP}$ , фокусирующее магнитное поле  $B_z$  направлено вдоль оси  $z$ .

Сначала была выбрана длина волны  $\lambda = 1$  мм. Радиус сферы фокусирующего зеркала  $R_0 = 65$  мм. Высота открытого резонатора  $H_{OP} = 5\lambda/2 = 2.5$  мм. Использовали многофокусное фокусирующее зеркало, в котором при проведении расчетов число фокусов  $N_\phi$  изменялось от 5 до 11 таким образом, что расстояние между крайними фокусами  $L_c$  оставалось неизменным и составляло величину 20 мм. Вместе с изменением числа фокусов  $N_\phi$  изменялось и расстояние между фокусами  $L_\phi$  в соответствии с выражением

$$L_\phi = L_c / (N_\phi - 1).$$

Период ДРПС  $l = 0.18$  мм, длина зазора  $d = 0.08$  мм. При использовании “полуволновой” ДРПС высота вдоль оси  $z$  ламелей  $h_z = 0.5$  мм. Для “промежуточной гребенки” высота ламелей  $h_z = 2b_1 + 2H =$



**Рис. 1.** Схема конструкции оротрона с фокусирующим многофокусным зеркалом: 1 – пятифокусное сферическое фокусирующее зеркало ОР с числом фокусов  $N_{\text{ф}} = 5$ , 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 пролета электронов.

$= 2 \times 0.148 + 0.1 = 0.396$  мм, где  $b_1$  – высота каждого ряда,  $2H$  – высота пролетного канала. В этих структурах для прохождения ленточного электронного пучка в центре ламелей прорезан пролетный канал высотой  $2H = 0.1$  мм и шириной  $2C = 4r_k$ . При использовании “четвертьволновой гребенки” высота ламели 0.25 мм и ленточный электронный пучок проходит над ламелями, почти касаясь их гребней. Как показывает расчет, поперечный размер (радиус) каустики на плоском зеркале  $r_k = 1.995$  мм (при  $H_{\text{ОР}} = 2.5$  мм для длины волны  $\lambda = 1$  мм).

## 2. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТКРЫТОГО РЕЗОНАТОРА С “ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ГРЕБЕНКОЙ” И ФОКУСИРУЮЩИМ МНОГОФОКУСНЫМ СФЕРИЧЕСКИМ ЗЕРКАЛОМ, У КОТОРОГО РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ КРАЙНИМИ ФОКУСАМИ $10r_k$

Расчеты ЭДХ ОР проводились для основных мод  $TEM_{0q}$  ( $q$  – число полуволн, укладываемых между зеркалами резонатора) на длине волны примерно  $\lambda = 1$  мм с использованием программного комплекса CST Microwave Studio [2], который предназначен для моделирования электромагнитных полей в сложных СВЧ-устройствах.

Для открытого резонатора, образованного многофокусным фокусирующим зеркалом и плоским с “промежуточной гребенкой”, рассчитаны зависимости электродинамических характери-

стик (ЭДХ): резонансных частот –  $f_0$ , добротностей колебаний –  $Q_0$ , нормы колебаний  $N_n$  относительной мощности потерь  $P_n/W = 2\pi f_0/Q_0$ . Сначала были проведены расчеты зависимости ЭДХ ОР от числа фокусов  $N_{\text{ф}}$  [3]. Результаты расчетов ЭДХ здесь не приводятся, так как были сделаны для ОР с “полуволновой”, “промежуточной” и “четвертьволновой гребенкой” на плоском зеркале, как в работе [4]. Кроме того, на печать выводились анимационные картины и распределения ВЧ-поля по координатам  $X, Y, Z$ . Как следует из расчетов, при использовании “промежуточной гребенки” в ОР собственная добротность его примерно в 1.4 раза больше, а относительная мощность потерь в 1.45 раза меньше, чем при использовании в ОР “полуволновой гребенки”. При сопоставлении ЭДХ ОР с “четвертьволновой гребенкой” и ЭДХ ОР с “промежуточной гребенкой” собственная добротность последнего оказалась примерно в 2.4 раза больше, а относительная мощность потерь в 2.4 раза меньше. В этой связи были проведены расчеты зависимости ЭДХ для ОР с  $N_{\text{ф}} = 11$  от величины гребня периодической структуры от  $h_z = 0.25$  мм, что соответствует “четвертьволновой гребенке”, до 0.5 мм, что соответствует “полуволновой гребенке”. Сначала были проведены расчеты ЭДХ для  $h_z = 0.25$  мм и 0.396 мм, а затем для  $h_z$  от 0.4 до 0.5 мм с шагом 0.02 мм вблизи  $\lambda = 1$  мм. Оптимальные значения ЭДХ ОР зафиксированы для высоты выступа  $h_z = 0.396$  мм при  $\lambda \approx 1.0138$  мм

( $f = 295.905$  ГГц), т.е. для “промежуточной гребенки”.

Так как для этой высоты выступа ( $h_z = 0.396$  мм) добротность ОР была максимальна при  $H_{ОР} = 2.5$  мм, были рассмотрены ЭДХ “промежуточной гребенки” с этим  $h_z$  в зависимости от высоты резонатора  $H_{ОР}$ . Были проведены расчеты ЭДХ для разных высот ОР, от 2.5 до 4 мм с шагом 0.2 мм для ОР с П-фокусным фокусирующим зеркалом. Расчет ЭДХ проводился, так же как и в предыдущих случаях, для каждой высоты. На печать выводились анимационные картины и распределения ВЧ-поля по трем координатам: продольной, вдоль пространства взаимодействия оротрона, —  $Z$ , поперек нее —  $X$  и вдоль оси симметрии ОР —  $Y$ . Здесь будут приведены только самые информативные примеры анимационных картин и изменения распределения ВЧ-поля по оси симметрии ОР —  $Y$ , которые представляют наибольший интерес. Следует обратить внимание на распределение яркости по высоте анимационных изображений ВЧ-поля и вид распределений ВЧ-поля по оси  $Y$ . На рис. 2а–2в представлены анимационные картины по трем координатам для  $H_{ОР} = 5\lambda/2 = 2.5$  мм, что соответствует расчетной частоте  $f_0 = 295.897$  ГГц и длине волны  $\lambda \approx 1.0138$  мм, и так как  $h_z = 0.396$  мм, то  $h_z/\lambda = 0.39$ .

На рис. 2г представлено распределение ВЧ-поля по координате  $Y$ . Такого же типа распределения ВЧ-поля по координате  $Y$  сохраняются вплоть до высоты ОР 3 мм. При  $H_{ОР} = 3$  мм,  $f_0 = 243.783$  ГГц,  $\lambda \approx 1.2306$  мм,  $h_z = 0.396$  мм,  $h_z/\lambda = 0.32179$ , и анимационная картина ВЧ-поля  $E_{005}$  по координате  $Y$  принимает вид, представленный на рис. 3а.

Как видно на анимационной картине ВЧ-поля по оси  $Y$ , максимум яркости возник в пределах пролетного канала, хотя на распределении ВЧ-поля по этой координате (см. рис. 3б) этот максимум не ярко выражен.

При  $H_{ОР} = 3.2$  мм,  $f_0 = 228.212$  ГГц,  $\lambda \approx 1.31456$  мм;  $h_z = 0.396$  мм,  $h_z/\lambda = 0.30124$  анимационная картина и распределение ВЧ-поля  $E_{005}$  по координате  $Y$  принимают вид, представленный на рис. 4а и 4б соответственно.

Распределение ВЧ-поля  $E_{005}$  по координате  $Y$  (см. рис. 4б) имеет вид распределения ВЧ-поля для “четвертьволновой гребенки” [4].

Этот вид распределения ВЧ-поля будет сохраняться и до высоты 4 мм включительно, когда для ВЧ-поля  $E_{005}$  длина волны  $\lambda = 1.6$  мм и  $h_z/\lambda = 0.396/1.6 = 0.2475$ .

Таким образом, впервые установлено, что в распределении ВЧ-поля по оси симметрии ОР (по координате  $Y$ ) “промежуточная” ДРПС “может вести себя” как полуволновая ДРПС с  $h_z = \lambda/2$  или

как “четвертьволновая гребенка” с  $h_z = \lambda/4$ , т.е. в последнем случае имеет место  $\lambda/4$ -резонанс. Использование этого свойства ДРПС в оротроне обеспечивает дополнительное увеличение эффективности электронно-волнового взаимодействия и, как следствие, должно приводить к увеличению КПД и выходной мощности. Происходит это, когда  $h_z/\lambda$  становится меньше 0.3...0.32.

### 3. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ОРОТРОНА КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С “ПРОМЕЖУТОЧНОЙ” ДРПС

Проведем оценку возможности реализации параметров ДРПС, необходимых для использования этого ее свойства в нашем экспериментальном макете оротрона коротковолновой части миллиметрового диапазона, а именно в диапазоне 1.9...1 мм, для увеличения КПД и мощности генерации.

Исходя из соотношения  $h_z/\lambda < 0.3...0.32$ , оценим высоту выступа  $h_z$  для длин волн в диапазоне  $\lambda = 1.5...1$  мм. Тогда для  $\lambda = 1.5$  мм (200 ГГц) получим  $h_z = 0.32 \times 1.5 = 0.48$  мм, т.е. при высоте пролетного канала 0.1 мм и одинаковой высоте рядов ДРПС высота каждого ряда  $b_1 = b_2 = 0.19$  мм. Однако для оптимизации напряженности электрического ВЧ-поля в пролетном канале (для выбранной длины волны) высоты рядов ДРПС могут быть разными. В данном случае, например,  $b_1 = 0.25$  мм, а  $b_2 = 0.13$  мм.

Следует отметить, что высота второго ряда в используемой конструкции ДРПС, не имеющего контакта с поверхностью плоского зеркала, как показал эксперимент, не может быть меньше чем 0.12 мм, если рабочий ток превышает 150 мА.

Теперь оценим высоту выступа  $h_z$  для длины волны  $\lambda = 1.0$  мм (300 ГГц) получим  $h_z = 0.32 \times 1.0 = 0.32$  мм, т.е. при высоте пролетного канала 0.1 мм и одинаковой высоте рядов ДРПС высота каждого ряда  $b_1 = b_2 = 0.11$  мм. При этом максимум ВЧ-поля находится на высоте 0.25 мм, т.е. на высоте, при которой находится второй ряд ДРПС. При этом напряженность ВЧ-поля вблизи нижнего ряда, расположенного на плоском зеркале, оказывается существенно меньше, чем вблизи второго ряда. Для того чтобы вблизи второго ряда в пролетном канале напряженность ВЧ-поля была максимальной, необходимо, чтобы высота второго ряда была 0.07 мм. Тогда при высоте пролетного канала 0.1 мм высота первого ряда будет 0.15 мм. Таким образом, в этом случае нельзя реализовать оптимальную амплитуду ВЧ-поля в пролетном канале за счет изменения высоты рядов, как в предыдущем случае. Ситуацию можно было бы улучшить за счет уменьшения высоты пролетного канала, уменьшив ее, например, до 0.07 мм. Но,

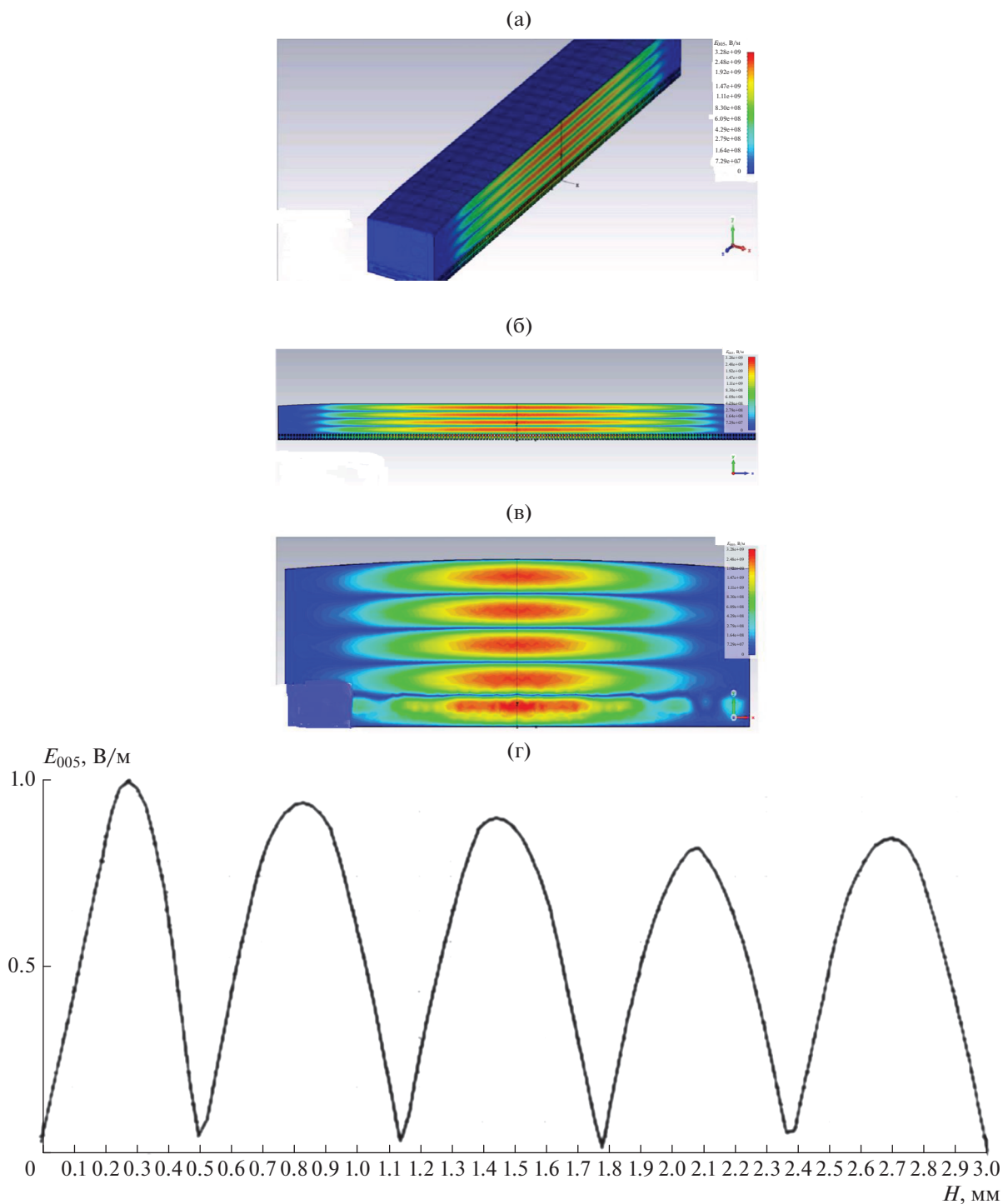


Рис. 2. Анимационные картины ВЧ-поля  $E_{005}$  по координатам  $Z$  (а),  $X$  (б),  $Y$  (в) и распределение ВЧ-поля по  $Y$  при  $X = 0, Z = 0$  (г).

во-первых, в нашем оротроне это по техническим причинам невозможно, а во-вторых, все равно высота второго ряда  $b_2 = 0.11\text{мм} < 0.12\text{мм}$ . Поэтому необходимо использовать новую конструкцию ДРПС, в которой это ограничение будет снято.

Как следует из расчетов, это замечательное свойство “промежуточной” ДРПС проявляется у нее на длинах волн существенно длиннее оптимальной, чем если бы эта ДРПС использовалась как “полуволновая” ( $\lambda = b_0/2$ ), и, наоборот, суще-

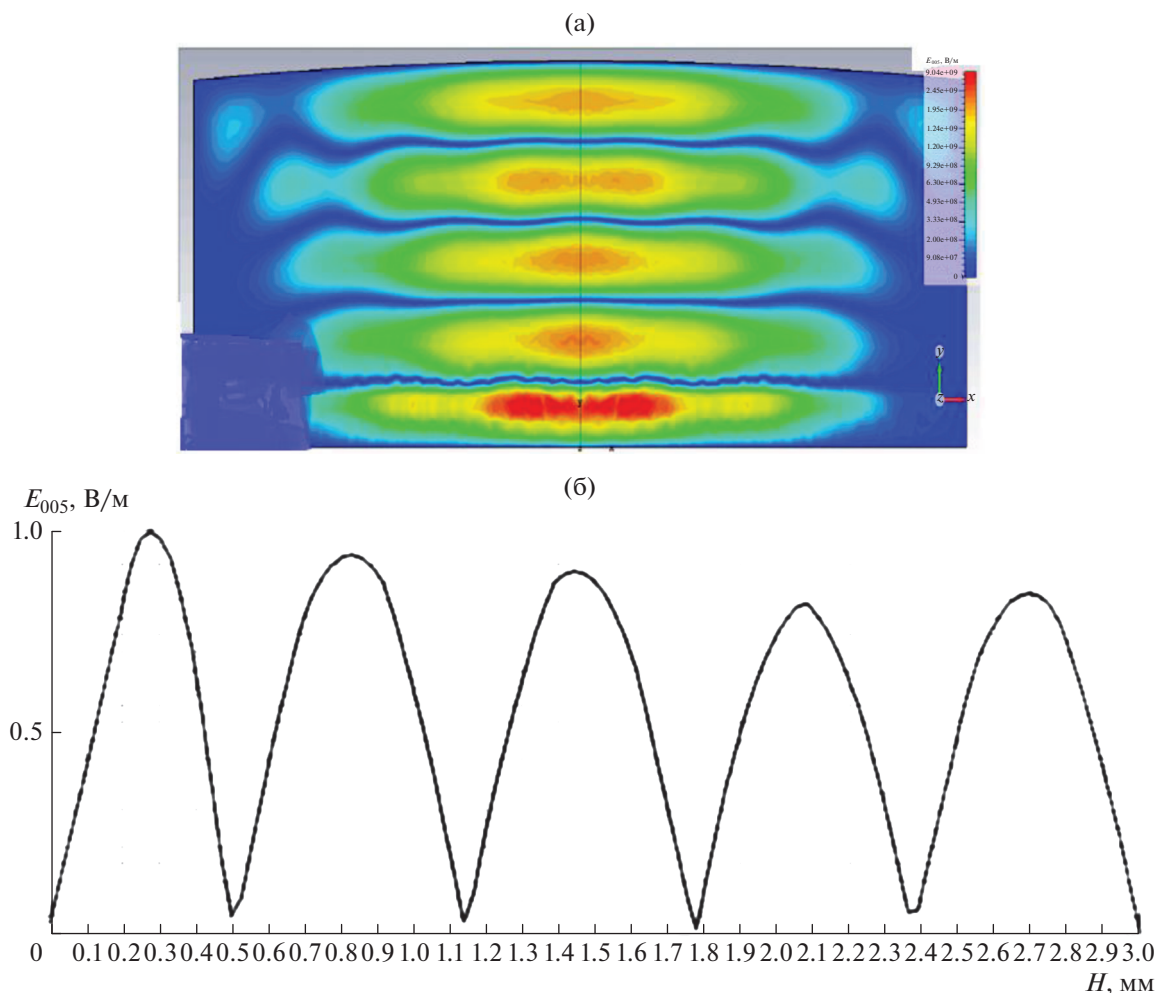


Рис. 3. Анимационная картина ВЧ-поля  $E_{005}$  по координате  $Y$  (а) и распределение ВЧ-поля по  $Y$  при  $X=0, Z=0$  (б).

ственно короче, чем если бы эта ДРПС использовалась как “четвертьволновая гребенка” ( $\lambda = b_0/4$ ). И в связи с тем, что максимум распределения ВЧ-поля в “полуволновой” ДРПС для длины волны  $\lambda = 1.0$  мм располагается на оси пролетного канала, в “промежуточной” ДРПС он располагается существенно выше оси пролетного канала.

Таким образом, в настоящее время для иллюстрации этого свойства открытого резонатора с “промежуточной” ДРПС в оротроне следует выбрать первый из рассмотренных вариантов возможной технической реализации такого прибора.

#### 4. КОНСТРУКЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАКЕТА ОРОТРОНА

На основе результата проведенного анализа, была разработана и создана конструкция оротрона с “промежуточной” ДРПС, имеющей соотношение высоты рядов  $b_1 = 0.25$  мм, а  $b_2 = 0.13$  мм, и проведены эксперименты по исследованию рабо-

ты такого оротрона [5]. В ОР использовалось сферическое сфероцилиндрическое зеркало с радиусом кривизны 32 мм цилиндра и сферы, при длине  $L_{ц} = 4$  мм каждого из семи цилиндров с образующей, перпендикулярной электронному потоку, и общей длиной 34.2 мм. Расстояние между “фокусами” соседних цилиндров составляло  $l_{ц} = 3.2$  мм. Цилиндрические участки фокусирующего зеркала позволяли при ширине катода 5 мм, обеспечивающего создание плоского электронного потока, создать практически по всей его ширине плоское распределение ВЧ-поля для основного типа колебания ОР вместо гауссова распределения при использовании простого сфероцилиндрического зеркала с образующей цилиндра вдоль пространства взаимодействия. Это обеспечило возможность эффективного электронно-волнового взаимодействия по всей его ширине. Так как неоднородность ВЧ-поля по высоте пролетного канала  $H = 0.1$  мм при периоде ДРПС  $l = 0.29$  мм определяет отношение  $l/H \approx 3$ , то ее также можно

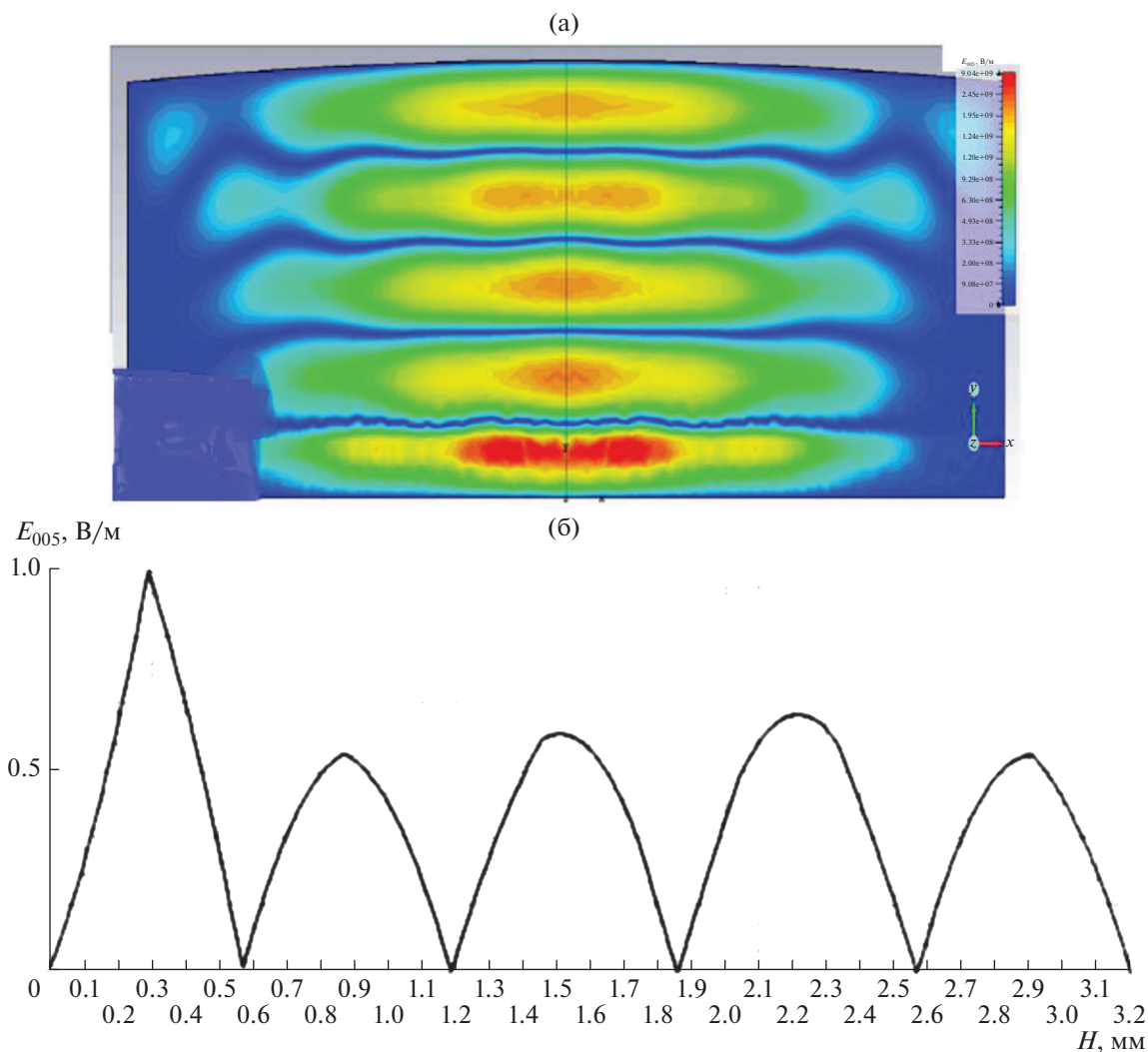


Рис. 4. Анимационная картина ВЧ-поля  $E_{005}$  по координате  $Y$  (а) и распределение ВЧ-поля по  $Y$  при  $X=0, Z=0$  (б).

не учитывать [6], т.е. эффективно работает весь плоский электронный поток. При этом длина плоского зеркала со структурой должна обеспечивать отсутствие дифракционных потерь. Как показано в работе [7], минимальный размер круглых сферических зеркал определяется условием:

$$\lg \Delta g = -0.87(a/r_k)^2 < -1 \times 10^{-2},$$

где  $a$  – радиус круглого зеркала,  $\Delta g$  – относительные дифракционные потери волны при одном отражении от зеркала.

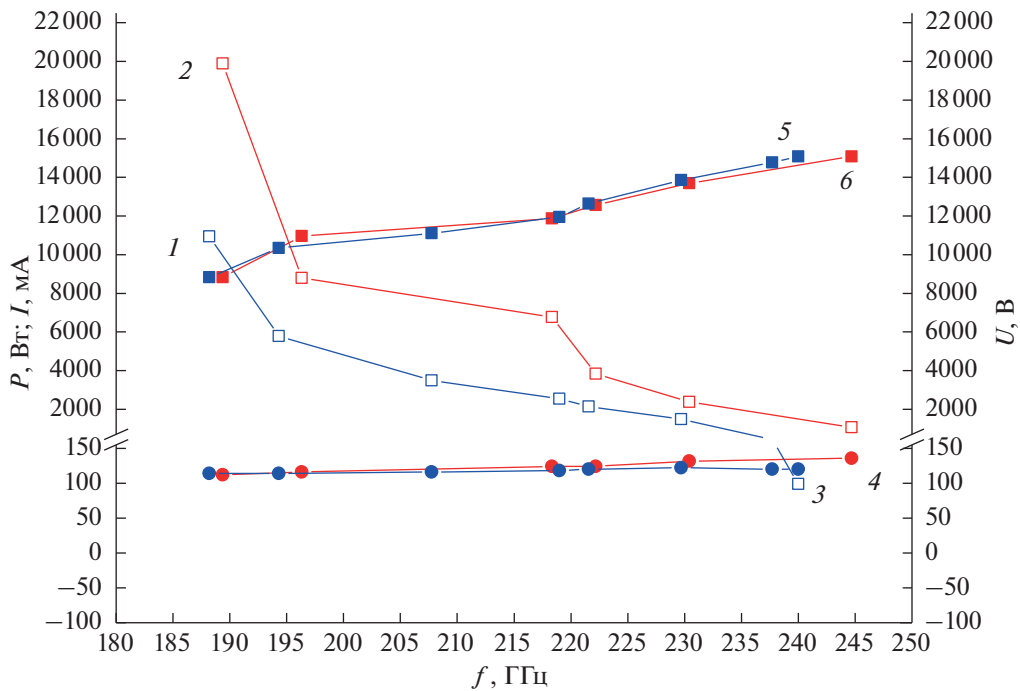
Поэтому длина плоского зеркала  $L_{з,пл} = 3.2 \times 6 + 4r_k = 19.2 + 4 \times 2.68 = 29.92$  мм, а длина взаимодействия  $L = 3.2 \times 6 + 3r_k = 19.2 + 3 \times 2.68 = 27.24$  мм;  $L^2 = 7.52$  см<sup>2</sup>. Так как радиус каустики на фокусирующем зеркале определяется по формуле  $r_k = \{(\lambda/\pi)[(R^2H)/(R-H)]^{0.5}\}^{0.5} = 3.11$  мм, то длина фокусирующего зеркала, достаточная для отсутствия дифракционных потерь, будет  $19.2 + 4 \times$

$\times 3.11 = 31.645$  мм. Результаты экспериментального исследования приведены на рис. 5.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 5 представлены две зависимости выходной мощности оротрона от частоты генерации для двух значений величины связи с нагрузкой  $D$  3 мм и 2.5 мм. Они определяют расстояние отверстия вывода энергии в плоском зеркале ОР во внешний волноводный тракт от максимума ВЧ-поля в последнем (от катодного края зеркала) “сфероцилиндре” фокусирующего semifокусного сфероцилиндрического зеркала. Чем это расстояние больше, тем связь с нагрузкой меньше, и если оно меньше, то связь с нагрузкой больше.

Как видно на рис. 5, ВЧ-мощность, генерируемая прибором, резко нарастает с уменьшением частоты. Как показал проведенный выше анализ



**Рис. 5.** Зависимость выходной мощности  $P_1$  (1),  $P_2$  (2), тока пучка  $I_1$  (3),  $I_2$  (4), напряжения  $U_1$  (5),  $U_2$  (6) от частоты при разной величине связи ОР ( $D_1, D_2$ ) с нагрузкой в оротроне с семифокусным сфероцилиндрическим фокусирующим зеркалом ОР:  $D_1 = 3$  мм,  $D_2 = 2.5$  мм.

ЭДХ ОР, причиной такой зависимости может являться неизвестное ранее свойство ДРПС изменять характер распределения ВЧ-поля вдоль оси ОР. Тот факт, что резонансное увеличение ВЧ-мощности на частоте  $\approx 190$  ГГц связано именно с неизвестным ранее свойством ДРПС, был подтвержден в работе [5] также расчетом КПД оротрона с этим семифокусным зеркалом по “Программе расчета” [8]. В расчете было показано, что при нагруженной добротности  $Q = 2000$ , рабочем токе 100 мА и напряжении 9 кВ, на длине волны 1.58 мм может быть получен эффективный режим генерации с выходной мощностью до 20 Вт и КПД в нагрузке до 2.2%.

Следует отметить, что для получения эффективных режимов работы оротрона с использованием этого свойства “промежуточной” ДРПС необходимо выполнить целый ряд условий при разработке конструкции прибора. О некоторых из них было сказано раньше. Так, необходимость оптимизации связи ОР с нагрузкой иллюстрирует рис. 5, а возможность использовать всю ширину электронного потока позволяет конструкция фокусирующего зеркала ОР. Однако чтобы реализовать эффективный режим работы оротрона, нужно, прежде всего, оценить параметры прибора, при которых возможно его самовозбуждение, т.е. пусковой ток генерации, который должен быть не менее чем в два раза меньше рабочего тока этого режима. Так как рассматриваемый режим работы

аналогичен режиму работы оротрона с “четверть-волновой гребенкой”, то рассмотрение следует провести так, как это сделано в работе [9]. Этот вопрос рассмотрен подробно в Приложении. В результате найдено расчетное значение пускового тока генерации в приборе, которое составило 40.4 мА, что практически совпадает с измеренным в эксперименте значением в 40 мА.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представлены результаты исследования электродинамических характеристик открытых резонаторов (ОР), образованных многофокусным (от пяти до одиннадцати фокусов) сферическим и плоским зеркалами с тремя типами периодических структур на плоском зеркале. На основе сравнения ЭДХ периодических структур для ламелей разных высот  $h_z$  (от  $\lambda/4 \leq h_z \leq \lambda/2$ ) выбрана высота, оптимальная для “промежуточной” двухрядной структуры  $h_z = 0.396$  мм. Для выбранной высоты  $\lambda/4 < h_z < \lambda/2$  для ОР с 11-фокусным сферическим зеркалом и переменной высотой ОР ( $H_{ОР}$ ) от 2.5 до 4 мм при неизменном количестве полуволн (равным пяти), т.е. увеличением длины волны, исследованы распределения ВЧ-поля по трем координатам. В результате анализа впервые установлено, что в распределении ВЧ-поля по оси симметрии ОР (по координате  $Y$ ) “промежуточная” ДРПС “может вести себя” как полу-

волновая ДРПС с  $h_z = \lambda/2$  или как “четвертьволновая гребенка” с  $h_z = \lambda/4$ , т.е. в последнем случае имеет место  $\lambda/4$ -резонанс. Использование этого свойства ОР с ДРПС в оротроне при  $h_z/\lambda < 0.3...0.32$  обеспечивает увеличение эффективности электронно-волнового взаимодействия и, как следствие, должно приводить к увеличению КПД и выходной мощности. Проведена оценка возможности создания оротрона с использованием ОР с “промежуточной” ДРПС в коротковолновой части миллиметрового диапазона. На основе результатов этого анализа разработана конструкция оротрона диапазона 1.3...1.6 мм и создан прибор с фокусирующим semifокусным сфероцилиндрическим зеркалом и “промежуточной” ДРПС на плоском зеркале. Проведено его экспериментальное исследование, в котором зафиксирована генерация на частоте  $\approx 190$  ГГц в 20 Вт при напряжении 9 кВ и токе 100 мА с КПД в нагрузке  $\approx 2.2\%$ . Численное моделирование этого режима по Программе расчета [8] подтвердило возможность его реализации при нагруженной добротности  $Q_{ОР} = 2000$ . Был также проведен расчет пускового тока генерации для этого режима, в результате которого расчетное значение пускового тока практически совпало с измеренным в эксперименте.

### ПРИЛОЖЕНИЕ

В работе [9] получены две формулы для пускового тока с малым и большим пространственным зарядом. Поэтому прежде всего нужно определить, к какому из них следует отнести рассматриваемый режим. Для этого необходимо вычислить [9] параметр  $\varphi_p = h_p L$ , где  $L$  – длина взаимодействия,  $h_p = \omega_p/V_e$ ,  $\omega_p$  – плазменная частота,  $V_e$  – скорость электронов потока. Если  $\varphi_p \ll 1$ , то пространственным зарядом можно пренебречь и использовать для пускового тока формулу (50) из работы [9] для малого пространственного заряда, а если  $\varphi_p \gg 1$ , то следует использовать формулу (51) из той же работы [9]. Таким образом, для того чтобы сделать выбор между этими двумя формулами, необходимо вычислить  $\varphi_p$ . Следуя и во всех дальнейших расчетах работе [9], получаем выражение для вычисления  $\varphi_p$  для малого пространственного заряда, используя [9, формула (49)]

$$\varphi_p = (2\pi\Gamma\pi^2/8\psi Q)^{0.5}, \quad (\text{П.1})$$

а также [9, формула (50)]. В (П.1)  $\Gamma$  – коэффициент уменьшения плазменной частоты,  $Q$  – нагруженная добротность ОР,  $\psi = W_1/W$  – коэффициент использования электрического поля в ОР ( $W_1$  – энергия первой пространственной гармоники в объеме плоского электронного потока, а  $W$  – энергия ВЧ-поля, запасенная в ОР) [9, формула (43)]:

$$\psi = W_1/W = \theta B^2 S_0 L / 8\pi W, \quad (\text{П.2})$$

$\theta$  – коэффициент использования электронного потока, в данном случае равный 1, так как неоднородность ВЧ-поля по ширине и толщине электронного потока можно не учитывать.

Для нашего прибора толщина плоского электронного потока  $2H = 0.1$  мм при периоде ДРПС  $l = 0.29$  мм определяет отношение  $l/2H \approx 3$ , и так как в соответствии с [9, формула (32)]

$$B = [1 + \exp(-2H\pi/l)] A_1/2, \quad (\text{П.3})$$

то

$$B = [1 + \exp(-2.093)] A_1/2 \approx (1.123/2) A_1 = 0.5615 A_1,$$

поэтому

$$B^2 = \{[1 + \exp(-2H\pi/l)] A_1/2\}^2 \approx 0.31528 (A_1)^2. \quad (\text{П.4})$$

Подставляя значения  $S_0 = 0.01 \times 0.5 \text{ см}^2$  и  $L = L_{7\text{ц}} + 3r_k = 3.2 \times 6 + 3 \times 2.68 = 27.24 \text{ мм} = 2.7245 \text{ см}$  в формулу (П.2) для  $\psi$  имеем

$$\psi \approx 0.171 \times 10^{-3} / W. \quad (\text{П.5})$$

Следует обратить внимание на то, что для определения длины взаимодействия  $L$  к  $L_{7\text{ц}}$  добавляется не  $4r_k$ , а  $3r_k$ , т.е. не по  $2r_k$  на плоском зеркале от сферической поверхности с каждой стороны semifокусного сфероцилиндрического фокусирующего зеркала. Необходимость такого решения основывается на экспериментальных результатах определения пускового тока в ОР с различными многофокусными фокусирующими зеркалами. Если бы длина взаимодействия была  $L_{7\text{ц}} + 4r_k$ , то  $W_1 = 0.171 \times 10^{-3}$  следовало увеличить в  $29.92/27.24$  раз и тогда получили бы

$$\psi_0 = 1.075 \times 0.171 \times 10^{-3} / W \approx 0.184 \times 10^{-3} / W. \quad (\text{П.6})$$

Таким образом, величина  $\psi_0$  увеличилась, и в результате уменьшились величины  $\varphi_p$  и пускового тока  $I_0$ .

Теперь необходимо вычислить  $W$ . В работе [9, формула (44)], приводится выражение

$$W = v_1 (A_1)^2 V / 8\pi, \quad (\text{П.7})$$

где  $V$  – объем ОР,  $A_1$  – амплитуда первой пространственной гармоники,  $v_1 = \pi^2/8$  для оптимальной “четвертьволновой гребенки”, у которой отношение ширины к периоду  $d/l = 0.5$ , и высота гребня  $h = b_0 = \lambda/4$ . Поэтому отношение  $A_1/A_0 = 0.637$  ( $A_0$  – амплитуда ВЧ-поля в ОР).

Первое условие в ДРПС экспериментального макета оротрона выполнено. Однако второе условие, конечно, не выполнено. Но поскольку оротрон с этой ДРПС ведет себя так, как будто оно должно выполняться, то выражение (П.7) будем



считать справедливым с  $v_1 = \pi^2/8$ . Тот факт, что для нашего прибора  $b_0/\lambda = 0.3$ , а отношение  $A_1/A_0 = 0.5$ , будет учтен в расчете  $W_1$ . Вычисляем

$$W = \pi(A_1)^2 V / 64 = [\pi(A_1)^2 S_1] H_{OP} / 64,$$

где  $S_1$  – площадь поверхности плоского зеркала,  $H_{OP}$  – высота ОР.

Площадь плоского зеркала

$$S_1 = (l_{ц} + 4r_k)L_{з.пл} = (4 \text{ мм} + 4 \times 2.68) \times 29.92 = 14.72 \times 29.92 \text{ мм} = 440.422 \text{ мм}^2 \approx 4.404 \text{ см}^2,$$

$$H_{OP} = 8.583 \text{ мм} = 0.8583 \text{ см}.$$

Итак,

$$\begin{aligned} W &= \pi(A_1)^2 V / 64 = \\ &= \pi(A_1)^2 S_1 H_{OP} / 64 \approx 0.185(A_1)^2. \\ \psi &= W_1/W = 0.171 \times 10^{-3} (A_1)^2 / W = \\ &= (A_1)^2 \times 0.171 \times 10^{-3} / 0.185(A_1)^2. \end{aligned} \quad (\text{П.8})$$

Отсюда следует

$$\begin{aligned} \psi &\approx 0.924 \times 10^{-3}, \\ \psi_0 &\approx 0.184(A_1)^2 / 0.185(A_1)^2 = 0.9935 \times 10^{-3}. \end{aligned} \quad (\text{П.9})$$

Однако, как говорилось ранее, наша структура, хотя и ведет себя как “четвертьволновая гребенка”, но с параметрами, отличными от оптимальных. Действительно, для оптимальной “четвертьволновой гребенки” необходимо, чтобы  $b/\lambda = 0.25$ , и тогда  $A_1/A_0 = 0.637$ . Но в случае нашего эксперимента  $b/\lambda = 0.3$  и  $A_1/A_0 = 0.5$ . Так как энергия, запасенная в электронном потоке,  $W_1 \sim A_1^2$ , а в ОР  $W \sim A_0^2$ , то коэффициент  $\psi = W_1/W \sim (A_1/A_0)^2$  и должен быть соответственно уменьшен до  $\psi_1$ , а  $\psi_0$  до  $\psi_{01}$  соответственно:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= W_1(0.5/0.637)^2 / W = \\ &= W_1 \times 0.616 / W = 0.569 \times 10^{-3}, \\ \psi_{01} &= 0.9935 \times 0.616 \times 10^{-3} = \\ &= 0.61199 \times 10^{-3} \approx 0.612 \times 10^{-3}. \end{aligned}$$

Подставляя значения  $\psi_1 = 0.569 \times 10^{-3}$  и  $Q = 2000$  в формулу (П.1), получим  $\psi_1 Q \approx 1.14$ , и полагая  $\Gamma = 0.5$  [6], для малого пространственного заряда получим

$$\begin{aligned} \phi_p &= (2\pi\Gamma\pi^2/8\psi Q)^{0.5} = 3.3946^{0.5} \approx 1.829, \\ &\text{или } 1.966, \text{ т.е. } \approx > 1. \end{aligned}$$

Однако в работе [9] приводится выражение  $q_2/q_1 = 64\Gamma/\pi^3\psi Q$ , где  $q_2$  и  $q_1$  – вычислены по [9, формулы (51) и (50)] для большого и малого пространственного заряда соответственно. Также указыва-

ется, что в случае, если это отношение меньше 1, пространственный заряд мало влияет на взаимодействие электронного потока с ВЧ-полем. В нашем случае  $q_2/q_1 = 64\Gamma/\pi^3\psi Q \approx 0.91$  для  $\psi_1$ , или 0.978 для  $\psi_{01}$ , и можно для вычисления пускового тока пользоваться формулой из [9, (50)] для малого пространственного заряда:

$$I_0 = 8 \times 10^{-5} S_0 U_0^{3/2} / L^2 \psi Q. \quad (\text{П.10})$$

Подставляя в формулу значения  $S_0 = 5 \times 10^{-3} \text{ см}^2$ ,  $U_0 = 9 \times 10^3 \text{ В}$ ,  $L = 2.724 \text{ см}$ ,  $\psi_1 Q \approx 1.14$ , получаем

$$\begin{aligned} I_0 &\approx (8 \times 10^{-5} \times 5 \times 10^{-3} \times \\ &\times (9^3 \times 10^9)^{0.5} / 2.724^2 \times 1.14) A = \\ &= 40.37 \times 10^{-3} A \approx 40.4 \text{ мА}. \end{aligned}$$

Это значение пускового тока весьма близко к значению 40 мА, наблюдаемому в эксперименте. В случае если бы в выражении для  $W_1$  длина взаимодействия была не 2.724 см, а 2.929 см, то расчетное значение пускового тока было бы меньше измеренного в  $(2.929/2.724)^3 = 1.243$  раз и составило бы 32.5 мА.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю., Соловьёв А.Н. Оротрон. Патент РФ на полезную модель № 87830. Оpubл. офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 29 от 20.10.2009.
2. Курушин А.А., Пластиков А.Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. М.: МЭИ, 2010.
3. Мясин Е.А., Соловьёв А.Н. // Матер. 27-й Междунар. Крым. конф. “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. Севастополь, 2017. С. 381.
4. Мясин Е.А., Соловьёв А.Н. // РЭ. 2018. Т. 63. № 7. С. 652.
5. Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю., Соловьёв А.Н. // Журн. радиоэлектроники 2020. № 2. <http://jre.cplire.ru/jre/feb20/9/text.pdf>.
6. Белявский Б.А., Цейтлин М.Б. // РЭ. 1980. Т. 25. № 5. С. 1108.
7. Богомолов Г.Д. Исследование генерации оротрона в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Канд. дис. ... физ.-мат. наук. М.: ИПФ АН СССР, 1968. 123 с.
8. Андреев Ю.В., Мясин Е.А. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2016613929. Оpubл. офиц. бюл. “Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем” № 5 от 20.05.216.
9. Русин Ф.С. Линейная теория оротрона. Электроника больших мощностей. Сб. 5. М.: Наука, 1968. С. 9.