

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ГЕНЕРИРУЕМОЙ МОЩНОСТИ В ОРОТРОНЕ С ДВУХРЯДНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН\*

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

Рассмотрены особенности электродинамической системы оротрона с двухрядной периодической структурой (ДПС) и методы увеличения генерируемой мощности в оротроне с ДПС коротковолновой части миллиметрового диапазона волн. Впервые экспериментально в оротроне с ДПС диапазона 140...300 ГГц со сфероцилиндрическим фокусирующим зеркалом открытого резонатора, образующая цилиндра которого параллельна электронному потоку, показана возможность увеличения мощности генерации за счет увеличения ширины потока. Впервые экспериментально в оротроне 2 мм диапазона (100...150 ГГц) с ДПС с фокусирующим зеркалом открытого резонатора в виде двухфокусного сфероцилиндра, образующая которого может быть перпендикулярна или параллельна электронному потоку, показана возможность увеличения мощности генерации за счет увеличения ширины потока до величины, большей четырех радиусов каститики. Впервые в оротроне с ДПС 2 мм диапазона с этим зеркалом показана возможность 20...30% перестройки по частоте с неравномерностью уровня мощности не более 5 дБ.

*Ключевые слова:* Оротрон, двухрядная периодическая структура, открытый резонатор, миллиметровый диапазон, терагерцовый диапазон.

### Введение

Оротрон был предложен Ф.С. Русиным и Г.Д. Богомоловым в 1966 году [1]. Отличительной особенностью этого прибора была открытая гребенчатая периодическая структура, расположенная на плоском зеркале открытого резонатора (ОР). Плоский электронный поток проходил над гребнями этой структуры. Его фокусировка осуществлялась внешним магнитным полем. С тех пор появилось достаточно много разновидностей приборов с ОР как с названием оротрон, например [2], так и с другим названием [3]. Исследования оротрона с двухрядной периодической структурой имеют в ИРЭ АН СССР и ИРЭ РАН давнюю историю [4] и в настоящее время направлены на раскрытые возможности использования преимуществ этого прибора в терагерцовом диапазоне частот [5].

\*Статья написана по материалам доклада на XV Зимней школе по электронике сверхвысоких частот и радиофизике, Саратов, Россия, 6–11 февраля 2012.

В ИРЭ АН СССР эти исследования были инициированы заведующим отделом электроники д.т.н. Заремом Сергеевичем Черновым, который при выполнении НИР в интересах Министерства обороны СССР предложил использовать оротрон для создания генератора 3 см диапазона мегаваттного уровня мощности. По понятным причинам экспериментальные работы велись по закрытому плану. Для решения поставленной задачи необходимо было выяснить принципиальную возможность реализации высоко-эффективного электронно-волнового взаимодействия в таком приборе. Теоретическая работа была начата в 1976 году и к началу 1980 года такая возможность впервые была показана [6,7]. Схема оротрона с двухрядной периодической структурой (ДПС) представлена на рис. 1. Основными отличиями мощного оротрона с ДПС коротковолновой части сантиметрового и длинноволновой части миллиметрового диапазона являются: наличие пролетного канала между рядами периодической структуры и малая высота  $H_{ор}$  открытого резонатора. Первая особенность обеспечивает распределение ВЧ-поля по высоте пролетного канала по гиперболическому косинусу (в отличие от экспоненциального распределения для однорядной структуры) и, как следствие, возможность использования «толстых» электронных потоков с большими токами. Вторая особенность обеспечивает большую плотность энергии излучения в резонаторе и, следовательно, большую эффективность электронно-волнового взаимодействия. Следует подчеркнуть, что увеличение генерируемой мощности происходит только в том случае, если добротность основного типа колебаний  $TEM_{00q}$  достаточно высокая и обеспечивается оптимальный КПД ОР ( $\eta_{ор} = 1 - Q_n/Q_0$ , где  $Q_n$ ,  $Q_0$  – нагруженная и собственная добротности ОР, соответственно). В настоящее время нелинейная теория оротрона разработана достаточно полно. Обзор работ с анализом эффективных режимов был сделан в [8].

Отметим, что разработка нелинейной теории резонансных генераторов с открытыми электродинамическими системами велась также и на Украине в Харьковском университете им. Кармазина [9] и Харьковском институте радиофизики и электроники АН УССР [10]. Однако экспериментальные исследования этих генераторов дифракционного излучения в ХИРЭ АН УССР проводились при низком напряжении (2...4 кВ), приборы имели КПД не более 1...4% и малую выходную мощность [10].

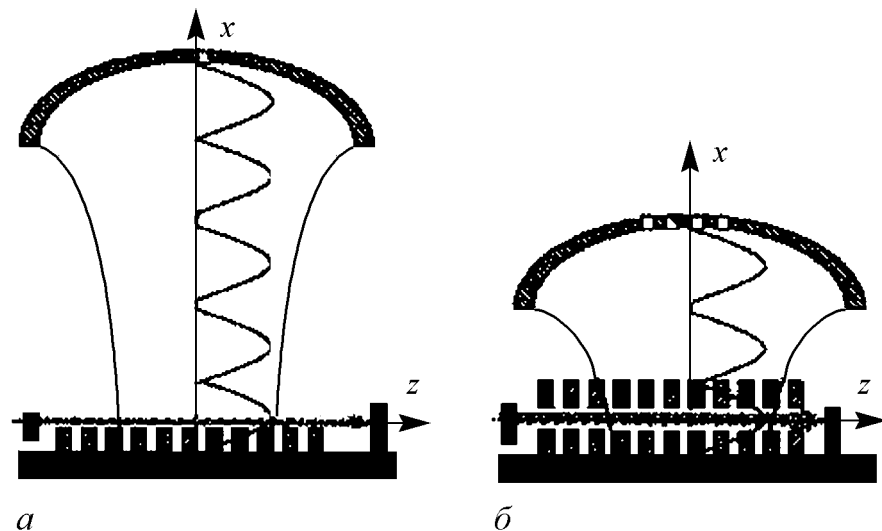


Рис. 1. Схемы оротронов: *а* – оротрон Ф.С. Русина; *б* – оротрон с ДПС

Напомним кратко основные результаты теоретических исследований, проведенных ранее. В [7,9] рассмотрена одномерная теория с учетом пространственного заряда. В [11] проведен анализ работы оротрона на основе двухмерной теории в пренебрежении пространственным зарядом. Показано, что в режиме больших амплитуд неоднородность ВЧ-поля по толщине и ширине электронного потока оказывает существенное влияние на основные энергетические характеристики прибора. Приведена зависимость КПД от фокусирующего магнитного поля. Наиболее строгая теория, учитывающая расслоение электронного потока под действием ВЧ-поля и поля пространственного заряда, приведена в [12]. Рассмотрены системы с однорядной и двухрядной структурой. Показано, что неоднородность ВЧ-поля по толщине электронного потока оказывает существенное влияние на электронный КПД для систем с однорядной структурой. Поэтому для реальных систем с конечной толщиной электронного потока высокоэффективные режимы могут быть получены только для систем с двухрядной периодической структурой. Поскольку использование двухмерной теории для конкретных расчетов и, особенно, для оптимизации параметров прибора достаточно громоздко, в [13] проведено сопоставление результатов расчета высокоэффективных режимов оротрона на основе одномерной и двухмерной теории. Показано, что достаточно точные результаты можно получить в рамках одномерной теории с введением коэффициентов неоднородности по толщине и ширине электронного потока. На основе результатов теоретического рассмотрения были получены экспериментальные результаты, представленные в Таблице, где:  $f$  – частота генерации,  $P_n$  – выходная импульсная мощность,  $KПД_n$  – коэффициент полезного действия в нагрузке,  $Q_n$  – нагруженная добротность открытого резонатора,  $U_0$  – напряжение,  $I_0$  – ток пучка,  $j$  – плотность тока в пучке.

Именно в оротроне с ДПС впервые у нас в стране и за рубежом были получены рекордные результаты по КПД и выходной мощности в 3 см, 8 мм и 3 мм диапазонах волн (см. Таблицу). Однако эти результаты были опубликованы только в 1990 году [14,15].

Таблица

| Год  | $f$ , ГГц | $P_n$ , кВт | КПД <sub>n</sub> , % | $Q_n$ | $U_0$ , кВ | $I_0$ , А | $j$ , А/см <sup>2</sup> |
|------|-----------|-------------|----------------------|-------|------------|-----------|-------------------------|
| 1984 | 10        | 53          | 35                   | 800   | 13         | 11.6      | 50                      |
| 1986 | 37.5      | 40          | 17                   | 2000  | 19         | 12        | 90                      |
| 1987 | 90        | 1.2         | 6                    | 5000  | 20         | 1.0       | 100                     |

### 1. Особенности электродинамической системы оротрона с ДПС. Методы увеличения генерируемой мощности в коротковолновой части миллиметрового диапазона волн

В Программу по освоению коротковолновой (короче, чем 3 мм) части миллиметрового диапазона волн (КВЧММДВ) на основе оротрона лаборатория ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН включилась в начале 2002 года по Договору с ИПФ РАН. В результате выполнения НИР необходимо было создать макет прибора, перестраиваемого по частоте в диапазоне 100 ... 140 ГГц ( $\lambda = 3 \dots 2,1$  мм).

Как видно из таблицы, наиболее перспективным генератором излучения в начале КВЧММДВ является оротрон с двухрядной периодической структурой [16]. Поэтому выяснение возможности продвижения именно этого прибора в КВЧММДВ представляло несомненный интерес. В связи с этим следовало выяснить возможность реализации эффективных режимов генерации в оротроне с ДПС этого диапазона.

Основываясь на результатах теоретических работ, для получения эффективных режимов работы оротрона на первой пространственной гармонике и основном типе колебаний  $TEM_{00q}$  ОР нужно выполнить следующие условия:

- 1) короткая длина  $L$  ДПС с числом периодов  $N = 20...30$ ;
- 2) введение скачка фазовой скорости на определенном расстоянии от начала взаимодействия;
- 3)  $L = 4r_k$ , где  $r_k$  радиус каустики полусферического ОР, а высота ОР по возможности минимальная:  $H_{ор} = (3...10)\lambda/2$ ;
- 4)  $L/(2H) > 3$ , где  $l$  – период,  $2H$  – высота пролетного канала;
- 5) Для увеличения мощности можно использовать широкие электронные потоки или несколько узких потоков.

Таким образом, для увеличения генерируемой мощности могут быть использованы либо методы оптимизации электронно-волнового взаимодействия (пп. 1–4) и увеличения рабочего тока (п. 5), либо только методы увеличения рабочего тока, когда оптимизация по пп. 1–4 не может быть выполнена.

Эти условия сформулированы для оптимизации параметров оротрона, работающего только на одной длине волны, с использованием полуволнового резонанса, причем для достаточно больших значений  $\lambda$ . Уже при длине волны  $\lambda = 3$  мм придется выбирать большую длину ДПС ( $N = 30$ ) и высоту ОР ( $H_{ор} = 10\lambda/2$ ).

Уменьшение длины волны обуславливает уменьшение размеров периодической структуры, прежде всего ее периода. Если рабочее напряжение не более 20 кВ, то при периоде 0.2 мм, в принципе, можно получить эффективную генерацию на длине волны 0.8 мм. Но для этого необходимо, чтобы пролетный канал был 0.05 мм. Кроме того, при существенном росте омических потерь в ДПС необходимо обеспечить соответствующую нагруженную добротность, чтобы рабочий ток прибора был выше пускового в 2–3 раза, а это, в свою очередь, накладывает жесткие требования на эмиттер электронов и на фокусировку электронного потока.

В наших экспериментах для оротрона с электронной пушкой, погруженной в магнитное поле, плотность тока с катода должна быть примерно  $100A/cm^2$ , а величина фокусирующего магнитного поля около 1 Тл.

В настоящее время реализовать эти требования в наших условиях практически невозможно. Поэтому даже для относительно длинноволнового прибора ( $\lambda = 1.5$  мм) электронный КПД не будет превышать 10%, и можно использовать для расчета параметров приближенную аналитическую теорию [17,18].

Первоначально для решения поставленной задачи в оротроне использовалась ДПС, в основу конструкции которой было положено использование полуволнового резонанса. Однако неравномерность величины генерируемой мощности по диапазону перестройки шириной в октаву ( $f_v/f_n = 2$ ) достигала 10 дБ (рис. 2).

Связано это с тем, что при этом не учитывалось влияние четвертьволнового резонанса на длине волны в два раза более длинной, чем для полуволнового резонанса. В отличие от оротрона с однорядной периодической структурой, в орот-

троне с ДПС может быть использован не один, а два особых резонанса в ее щелях: четвертьволновый и полуволновый. Понимание этой особенности дает возможность применить некоторые результаты работы [19] к электродинамической системе оротрона с ДПС. В частности, можно использовать четвертьволновый резонанс при создании ДПС как под задачу широкодиапазонной перестройки прибора, так и для увеличения выходной мощности по диапазону перестройки. При этом высота ДПС  $b_0 = b_1 + 2H + b_2 = \lambda/4$ , где  $b_1$  – высота нижнего ряда от плоского зеркала ОР,  $2H$  – высота пролетного канала,  $b_2$  – высота второго ряда. Варьируя величины  $b_1$ ,  $2H$ ,  $b_2$  можно оптимизировать генерируемую мощность, обеспечив малые ее изменения в диапазоне перестройки, что и будет показано в представленных результатах экспериментальных исследований.

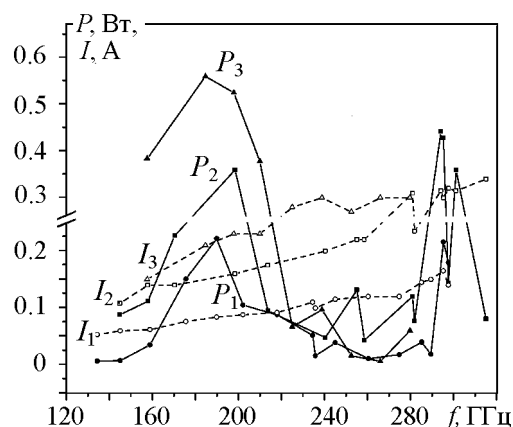


Рис. 2. Зависимости выходной мощности (сплошные кривые) и тока пучка (пунктир) от частоты генерации при ширине катода в мм: 1 – 5,0, 2 – 7,0, 3 – 10,0

## 2. Увеличение генерируемой мощности в оротроне диапазона 140...300 ГГц

В настоящее время идет интенсивное освоение терагерцового диапазона частот (100...3000 ГГц). В этот диапазон попадает коротковолновая часть миллиметрового диапазона волн, начиная с 2 мм диапазона (100...150 ГГц), и 1 мм диапазон (150...300 ГГц). Проблема увеличения генерируемой мощности в этих диапазонах волн для приборов О-типа с рабочим напряжением до 20 кВ является актуальной, и один из путей ее решения возможен в оротроне с ДПС за счет увеличения ширины плоского электронного потока.

В работе [20] теоретически было показано, что в оротроне с ДПС с полусферическим ОР сантиметрового диапазона волн ширину электронного потока ( $2C$ ) можно увеличивать до  $2r_k$ , обеспечив максимальную эффективность электронно-волнового взаимодействия. Объясняется это тем, что в таком ОР распределение амплитуды ВЧ-поля основного типа колебания  $TEM_{00q}$  является гауссовым как вдоль, так и поперек электронного потока. Однако даже при  $2C = 3r_k$  эффективность взаимодействия уменьшается примерно на 1,7%. Поэтому при сохранении неравенства  $2C \leq 3r_k$  уменьшение амплитуды поля на краях электронного потока компенсируется увеличением рабочего тока за счет увеличения его ширины при неизменной плотности тока в пролетном канале. В оротроне с ДПС в упомянутых ранее диапазонах, особенно в 1 мм диапазоне, для уменьшения пускового тока генерации приходится использовать ДПС с числом периодов  $N > 100$ , то есть более длинные, чем в оротронах сантиметрового и миллиметрового диапазонов, где  $N \approx 20$ . Поэтому для создания нужного распределения амплитуды поля вдоль пространства взаимодействия прибора использование полусферического ОР в оротроне 1 мм диапазона не является оптимальным и необходимо использовать ОР с фокусирующим зеркалом другой формы.

С этой целью нами впервые были проведены эксперименты с оротроном диапазона 140...300 ГГц со сфероцилиндрическим фокусирующим зеркалом ОР, образующая цилиндра которого, параллельна электронному потоку. В таком ОР распределение амплитуды ВЧ-поля поперек электронного потока является гауссовым. Поэтому, согласно выводам работы [20], ширину электронного потока можно увеличить до  $(2...3) r_k$ , увеличив тем самым рабочий ток и генерируемую оротроном мощность.

Детальная конструкция экспериментального макета, работающего при непрерывной откачке (рабочий вакуум примерно  $2 \cdot 10^{-7}$  мм Нг.) и импульсном режиме питания, описана в [21].

Параметры зеркала таковы: радиусы кривизны цилиндрической и сферической частей  $R_{ц} = R_{сф} = 65$  мм, расстояние между зеркалами  $H_{ор} = 10$  мм. Поэтому для  $\lambda = 1.5$  мм –  $r_k = 3.34$  мм на плоском зеркале, ширина которого 11 мм, а для  $\lambda = 1.0$  мм –  $r_k = 2.74$  мм. В оротроне с ДПС, имеющей период 0.2 мм и длину 33 мм были проведены измерения диапазона перестройки при трех значениях ширины электронного потока: 5 мм, 7 мм и 10 мм. Результаты эксперимента приведены на рис. 2.

Как видно на рис. 2, при ширине 7 мм мощность генерации возрастает по сравнению с шириной потока 5 мм практически во всем диапазоне перестройки по частоте. Особенно четко это видно на частотах двух резонансов 195 ГГц и около 300 ГГц, где она возрастает в два раза. При этом ширина электронного потока на частоте 195 ГГц составляет  $2.1r_k$ , а на частоте 300 ГГц –  $2.55 r_k$ . При увеличении ширины потока до 10 мм мощность генерации вблизи частоты 195 ГГц возрастает уже в 3 раза, но, начиная с частоты 245 ГГц, становится меньше даже мощности генерации при ширине потока 5 мм. При этом ширина электронного потока на частоте 195 ГГц составляет  $3.0 r_k$ , а на частоте 250 ГГц –  $3.3 r_k$ . В этой связи измерения для высокочастотной части диапазона перестройки не проводились.

Таким образом, при использовании в оротроне с ДПС ОР со сфероцилиндрическим фокусирующим зеркалом, образующая цилиндра которого параллельна электронному потоку, увеличение мощности генерации возможно за счет увеличения его ширины до  $3r_k$ , как и было предсказано теоретически в работе [20].

### 3. Увеличение генерируемой мощности в оротроне 2 мм диапазона

Дальнейшее увеличение ширины электронного потока возможно только при условии, что распределение ВЧ-поля поперек электронного потока будет иметь достаточно длинный плоский участок или более сложный, близкий к нему, вид [22]. Как показано в работе [23], в оротроне длинноволновой части миллиметрового диапазона в качестве такого ОР может быть использован ОР с фокусирующим сфероцилиндрическим зеркалом, образующая цилиндра которого перпендикулярна направлению движения электронного потока. Но в оротроне с длинной ДПС, о которой говорилось выше, ОР с одним таким зеркалом использовать невозможно, так как с его помощью нельзя создать нужное распределение ВЧ-поля вдоль пространства взаимодействия. В этом случае необходимо использовать многофокусное зеркало, образованное пересекающимися сфероцилиндрическими поверхностями со сдвигом друг относительно друга их фокальных осей [24]. Так как для ДПС с длиной пространства взаимодействия 33 мм такое зеркало выполнить достаточно сложно, было

решено провести предварительный эксперимент с двухфокусным сфероцилиндрическим зеркалом и относительно короткой (20 мм) ДПС в 2 мм диапазоне.

Эксперименты были проведены с разборным макетом оротрона, который располагался в вакуумной камере и работал при непрерывной откачке. Устройство камеры позволяет быстро менять элементы конструкции прибора: катод, расстояние между катодом и анодом, периодическую структуру, фокусирующее зеркало. В камере предусмотрена возможность изменения расстояния  $H_{ор}$  между зеркалами ОР за счет перемещения фокусирующего зеркала открытого резонатора вдоль его оси симметрии и таким образом осуществлять перестройку прибора по частоте. Описание конструкции разборного макета оротрона приведено в работе [5].

Была изготовлена ДПС с периодом 0.4 мм длиной 20 мм с высотой нижнего (от плоского зеркала) ряда  $b_1 = 0.3$  мм, высотой пролетного канала  $2H = 0.15$  мм и высотой верхнего ряда  $b_2 = 0.2$  мм. Таким образом, общая высота ДПС  $b_0 = b_1 + 2H + b_2 = 0.65$  мм и резонансная длина волны для четвертьволнового резонанса в ОР  $4b_0 = 2.6$  мм. Относительно большая величина пролетного канала обусловлена нарушением технологии изготовления данной ДПС. Это, в свою очередь, не позволило обеспечить в приборе нужное эффективное электронно-волновое взаимодействие и, как следствие, уровень генерируемой мощности более высокий, чем полученный в данном эксперименте. Было изготовлено двухфокусное сфероцилиндрическое зеркало с радиусами кривизны цилиндра и сферы  $R_{ц} = R_{сф} = 32$  мм, с расстоянием между фокальными осями 5 мм, длиной 22.5 мм вдоль образующей цилиндра и 20 мм поперек нее. Длина цилиндрической части зеркала была 7.5 мм. При изменении расстояния  $H_{ор}$  между зеркалами ОР от 7.8 до 9.8 мм радиус кастик на плоском зеркале ОР для  $\lambda = 3.2$  мм составляет соответственно 3.75...3.88 мм, для  $\lambda = 2.5$  мм – 3.26...3.43 мм и для  $\lambda = 2.0$  мм – 2.90...3.07 мм. На рис. 3 приведены распределения амплитуды ВЧ-поля  $E_x$  вдоль оси симметрии фокусирующего зеркала ОР в направлении, поперечном образующей цилиндра. Здесь расстояние между осями цилиндров  $d = 5$  мм, расстояние между зеркалами  $H_{ор} = 10$  мм, радиус кривизны сферической и цилиндрической частей  $R_{сф} = R_{ц} = 32$  мм, OS – расположение центра щели вывода энергии. Пунктирными линиями показано распределение  $E_x$  для однофокусного сфероцилиндра при тех же длинах волн. Таким образом, если зеркало установлено в ОР так, что это направление совпадает с направлением движения электронного потока, то гауссово распределение по длине взаимодействия для низких частот (кривая 3) трансформируется в почти плоское распределение для частот высоких (кривая 1). Длина эффективного взаимодействия увеличивается. Кроме того, при плоском распределении ВЧ-поля вдоль пространства взаимодействия эффективность его выше, чем при Гауссовом

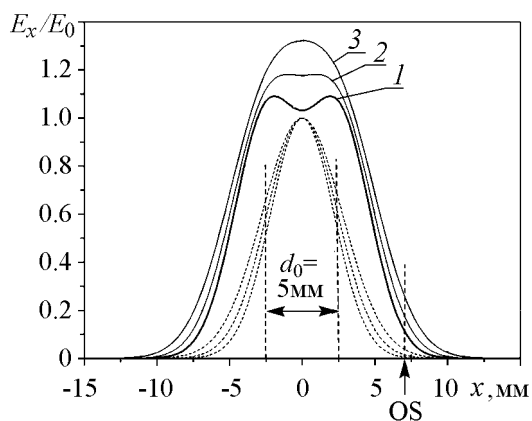


Рис. 3. Распределение амплитуды продольного высокочастотного электрического поля  $E_x$  вдоль оси симметрии фокусирующего зеркала ОР, образованного двухфокусным сфероцилиндрическим и плоским зеркалами в направлении, перпендикулярном образующей цилиндра, для различных значений длин волн  $\lambda$ , мм: 1 – 2.0; 2 – 2.5; 3 – 3.2

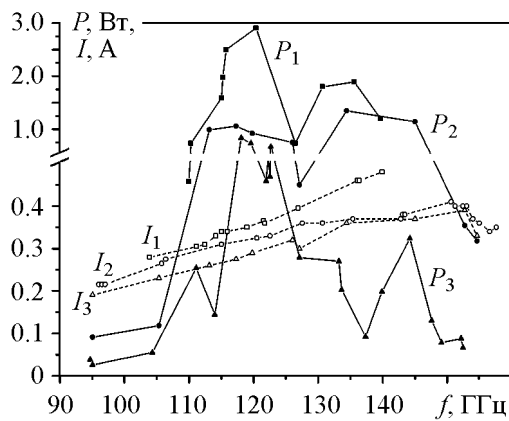


Рис. 4. Зависимости выходной мощности и тока пучка от частоты при поперечной ориентации образующей цилиндров фокусирующего зеркала относительно электронного потока для разных параметров связи ОР с нагрузкой: для  $P_1, I_1 - \Delta = +1$ ; для  $P_2, I_2 - \Delta = 0$ ; для  $P_3, I_3 - \Delta = -1$

при увеличении связи ( $\Delta = +1$ ), (то есть при сдвиге центра зеркала на 1 мм в сторону коллектора), этот диапазон сужается до 20% (115...140 ГГц), хотя максимальная мощность возрастает до 3 Вт. Еще больше полоса сужается при уменьшении связи ( $\Delta = -1$ ), то есть при сдвиге центра зеркала на 1 мм в сторону анода.

Таким образом, с помощью этого фокусирующего зеркала отношение ширины электронного потока к радиусу каустики на плоском зеркале ОР для длин волн 3.2 мм, 2.5 мм и 2.0 мм составила соответственно  $2.58r_k$ ,  $2.9r_k$ ,  $3.258r_k$  при максимальной высоте 9.8 мм и  $2.67r_k$ ,  $3.07r_k$ ,  $3.45r_k$  для минимальной высоты 7.8 мм, то есть возможно увеличение ширины электронного потока на величину большую, чем  $3 r_k$ .

Отметим также, что впервые в оротроне с ДПС удалось получить диапазон перестройки в 30% в 2 мм диапазоне волн вблизи четвертьволнового резонанса в щелях периодической структуры. Во многом этому способствовала возможность регулировки связи ОР с нагрузкой за счет смещения фокусирующего зеркала, о котором говорилось выше [26]. Смещение зеркала к аноду ( $\Delta = -1$ ), уменьшает связь ОР с нагрузкой, в первую очередь, для высоких частот, так как для них связь с нагрузкой всегда существенно меньше, чем для низких частот. И, наоборот, смещение к коллектору ( $\Delta = +1$ ) увеличивает эту связь (см. рис. 3).

Затем зеркало было установлено так, чтобы образующие цилиндров были параллельны продольной оси электронного потока, то есть повернуто на  $90^\circ$  вокруг оси симметрии ОР. В такой конфигурации были проведены те же измерения для трех величин связи ОР с нагрузкой (рис. 5). Два положения фокусирующего зеркала вдоль направления движения электронного потока были такими же ( $\Delta = 0, \Delta = +1$ ),

распределении [25]. Эта особенность распределения ВЧ-поля позволяет увеличить эффективность взаимодействия при перестройке на длинах волн короче резонансной длины волны.

Если же зеркало установлено так, что образующая цилиндра параллельна электронному потоку, то это почти плоское распределение ВЧ-поля реализуется поперек потока. Вдоль пространства взаимодействия распределение ВЧ-поля будет иметь вид сдвоенной «полки», переходящей в пересекающиеся Гауссовы распределения на анодном и коллекторном краях зеркала.

На рис. 4 приведены зависимости мощности от частоты для трех разных величин связи ОР с нагрузкой при ширине электронного потока 10 мм, когда фокусирующее зеркало ориентировано так, что образующая цилиндра направлена перпендикулярно потоку. Видно, что существует оптимальная связь ОР ( $\Delta = 0$ ) с нагрузкой, (когда центр зеркала совпадает с центром ДПС), при которой мощность в диапазоне перестройки от 110 ГГц до 150 ГГц (30%) изменяется не более, чем в 3 раза ( $-5$  дБ от максимальной мощности в 1.3 Вт).



как и в предыдущем эксперименте, а одно положение ( $\Delta = +2$ ), обеспечивало более сильную связь с нагрузкой. Видно, что при увеличении связи сохраняется та же тенденция увеличения генерируемой мощности и, особенно, на частотах выше частоты четвертьволнового резонанса. Это приводит к выравниванию величины генерируемой мощности по диапазону перестройки. Однако во всем диапазоне перестройки наибольшая величина мощности остается на частоте четвертьволнового резонанса при всех величинах связи ОР с нагрузкой. Тем не менее, диапазон перестройки и в этом случае составляет по уровню  $-5$  дБ величину  $18.6\%$ , перекрывая диапазон  $112...135$  ГГц.

Таким образом, показано, что в оротроне с ДПС и при таком положении фокусирующего двухфокусного сфероцилиндрического зеркала возможно использование электронных потоков шириной более или равной  $3r_k$ .

В заключение отметим, что были проведены такие же эксперименты с шириной электронного потока в  $14$  мм, что соответствует величине больше  $4r_k$ . Для положения фокусирующего зеркала с образующей цилиндра поперек электронного потока при оптимальной связи с нагрузкой ( $\Delta = 0$ ) генерируемая мощность увеличилась в  $4$  раза, но на частоте четвертьволнового резонанса и с сильным сужением диапазона перестройки (рис. 6). При этом увеличение тока пучка на коллектор по сравнению с катодом шириной  $10$  мм произошло в  $1.3$  раза при незначительном ( $0.95$ ) уменьшении плотности тока в пучке. Для положения фокусирующего зеркала с образующей цилиндра, направленной вдоль электронного потока, при связи с нагрузкой  $\Delta = +1$  генерируемая мощность увеличилась в  $1.5$  раза, но диапазон перестройки по уровню  $-5$  дБ практически не изменился, то есть составил примерно  $19\%$  (рис. 7).

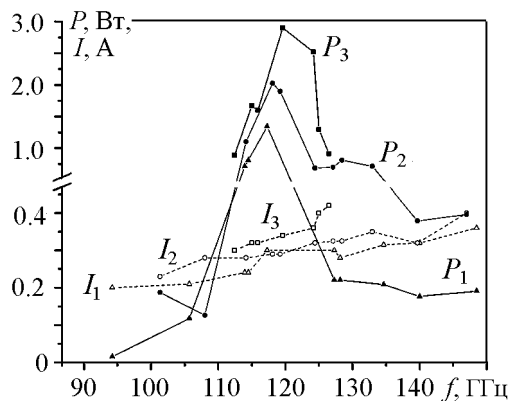


Рис. 5. Зависимости выходной мощности и тока пучка от частоты при продольной ориентации образующей цилиндров фокусирующего зеркала относительно электронного потока для разных параметров связи ОР с нагрузкой: для  $P_1, I_1 - \Delta = 0$ ; для  $P_2, I_2 - \Delta = +1$ ; для  $P_3, I_3 - \Delta = +2$

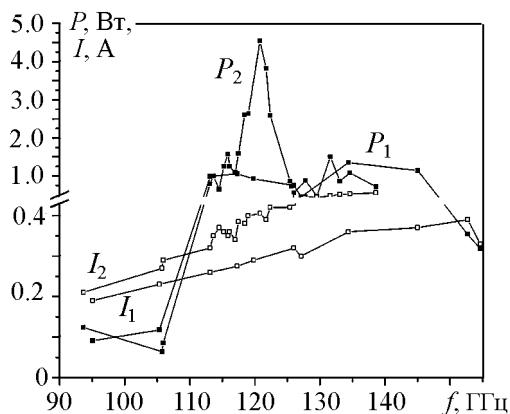


Рис. 6. Зависимости выходной мощности и тока пучка от частоты при поперечной ориентации образующей цилиндров фокусирующего зеркала относительно электронного потока для ширины электронного пучка в мм: 1 –  $10.0$ , 2 –  $14.0$

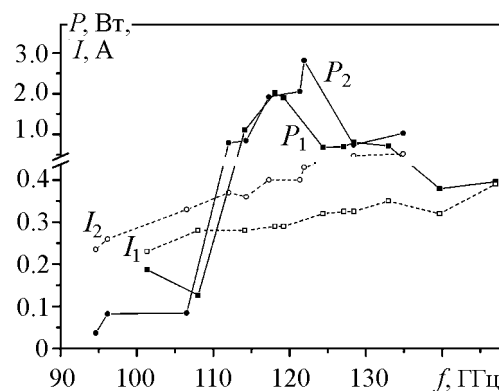


Рис. 7. Зависимости выходной мощности и тока пучка от частоты при продольной ориентации образующей цилиндров фокусирующего зеркала относительно электронного потока для ширины электронного пучка в мм: 1 –  $10.0$ , 2 –  $14.0$

## Заключение

1. Проведено рассмотрение особенностей электродинамической системы оротрона с двухрядной периодической структурой и их влияние на продвижение оротрона с этой структурой в коротковолновую часть миллиметрового диапазона и субмиллиметровый диапазон. Экспериментально в коротковолновой части миллиметрового диапазона волн показана возможность использования этих особенностей для увеличения генерируемой мощности и уменьшения уровня ее неравномерности в диапазоне перестройки по частоте.

2. Впервые в оротроне диапазона 140...300 ГГц с открытым полусфероцилиндрическим резонатором с образующей цилиндра, параллельной электронному потоку, показана возможность увеличения генерируемой мощности за счет увеличения ширины потока до 3 радиусов каустики.

3. Впервые в оротроне с двухрядной периодической структурой 2 мм диапазона показана возможность увеличения генерируемой мощности за счет использования двухфокусного фокусирующего сфероцилиндрического зеркала открытого резонатора, обеспечивающего увеличение ширины электронного потока до 4 радиусов каустики, причем с образующей цилиндра как поперек, так и вдоль потока.

4. Впервые в оротроне с двухрядной периодической структурой 2 мм диапазона с этим зеркалом показана возможность 20...30% перестройки по частоте с неравномерностью уровня мощности не более 5 дБ.

*Работа выполнена при частичной поддержке Программы ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики».*

## Библиографический список

1. Русин Ф.С., Богомолов Г.Д. Генерация электромагнитных колебаний в открытом резонаторе // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. 4, № 6. С. 236.
2. Цейтлин М.Б., Мясин Е.А. Оротрон. Анализ эффективных режимов // РЭ. 1993. Т. 38, № 6. С. 961.
3. Генераторы дифракционного излучения / Под ред. В.П. Шестопалова. Киев: Наукова думка, 1991. 320 с.
4. Мясин Е.А. Оротрон – мощный резонансный генератор О-типа сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн // Радиотехника. 2004. № 2. С. 22.
5. Мясин Е.А. Проблемы создания оротронов с двухрядной периодической структурой коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазона волн // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53, № 9. С. 1.
6. Цейтлин М.Б., Бернашевский Г.А., Котов В.Д., Цицонь И.Т. Анализ работы оротрона в нелинейном режиме // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22, № 7. С. 1515.
7. Цейтлин М.Б., Бернашевский Г.А., Котов В.Д., Нутович Л.М. Анализ энергетических характеристик оротрона в нелинейном режиме // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24, № 6. С. 1164.

8. *Цейтлин М.Б., Мясин Е.А.* Оротрон. Анализ эффективных режимов // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38, № 6. С. 961.
9. *Ваврив Д.М., Третьяков О.А., Шматько А.А.* К нелинейной стационарной теории резонансных генераторов с длительным взаимодействием // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23, № 11. С. 2354.
10. *Шестопалов В.П.* Дифракционная электроника. Харьков: Изд-во «Вища школа», 1976. С. 191 / Рекламный проспект ИРЭ АН УССР 1990 г. «Генераторы дифракционного излучения».
11. *Белявский Б.А., Цейтлин М.Б.* Анализ работы оротрона на основе двумерной теории // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25, № 5. С. 1108.
12. *Белявский Б.А., Цейтлин М.Б.* Влияние пространственного заряда на расслоение электронного потока в оротроне // Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27, № 4. С. 787.
13. *Белявский Б.А., Цейтлин М.Б.* Сопоставление результатов расчета высокоэффективных режимов оротрона на основе одномерной и двумерной теорий // Радиотехника и электроника. 1984. Т. 29, № 6. С. 1171.
14. *Мясин Е.А., Цейтлин М.Б., Белявский Б.А., Соловьёв А.Н. и др.* Оротрон – генератор когерентных электромагнитных колебаний большой мощности в сантиметровом и миллиметровом диапазонах // Рекламный проспект. ИРЭ АН СССР. М., 1990.
15. *Myasin Ye.A., Tseytlyn M.B., Belyavsky B.A., Solovjov A.N. et all.* Study of centimeter and millimeter wave range powerful orotron efficient regimes at the IRE of the academy of sciences of the USSR // 2nd Int. Conference on Millimeter Wave and Far Infrared Technology / Ed. M. Tucker. August 17–21, 1992. Beijing, China. P. 94.
16. *Белявский Б.А., Мясин Е.А., Соловьёв А.Н.* // АС № 1153743 от 05.08.83
17. *Цейтлин М.Б., Мясин Е.А., Нутович Л.М.* Оптимизация параметров оротрона на основе приближённой аналитической теории // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33, № 3. С. 580
18. *Myasin Ye.A., Tseitlin M.B., Nutovich L.M.* Analysis of the electron-wave interaction in the orotron on the basis of the approximate analytic nonlinear theory // IEEE Transactions on ED. 1990. Vol. 37, № 12. P. 2634
19. *Русин Ф.С., Богомолов Г.Д.* Колебательная система оротрона // Электроника больших мощностей / Под ред. П.Л. Капицы. Вып. 5. М.: «Наука», 1968. С. 36.
20. *Цейтлин М.Б., Мясин Е.А., Нутович Л.М.* Оптимизация параметров мощного оротрона сантиметрового диапазона длин волн с целью использования его для исследований плотной плазмы // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35, № 11. С. 2364.
21. *Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю.* Оротрон с двухрядной периодической структурой диапазона 140–300 ГГц // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56, № 4. С. 454.
22. *Мясин Е.А.* Оротрон. Патент РФ, кл. H01J 25/00. №87829. Б.И. 2009. №29.
23. *Русин Ф.С.* Диссертация на соискание учёной степени д.ф.-м. н. 1984. С. 29.

24. Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю., Соловьев А.Н. Оротрон. Патент РФ, кл. H01J 25/00. № 87830. Б.И. 2009. № 29.
25. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. В 2-х томах. Т. 1. С. 430. М.: Физматлит, 2003. 496 с.
26. Мясин Е.А., Белявский Б.А., Соловьев А.Н. Оротрон. Патент РФ, кл. H01J 25/00 № 2274922. Б.И. 2006. № 11.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,  
Фрязино

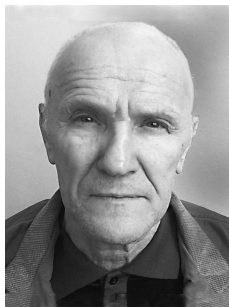
Поступила в редакцию 24.04.2012

## METHODS OF OUTPUT POWER INCREASING IN OROTRON WITH DOUBLE-ROW PERIODIC STRUCTURE IN THE SHORT-WAVELENGTH PART OF MILLIMETER-WAVE RANGE

*Ye.A. Myasin, V.V. Evdokimov, A.Yu. Il'yn*

The peculiarities of the orotron double-row electrodynamic system and methods of output power increase were investigated. For the first time in the experimental model of orotron with electrodynamic system consisting of double-row plain periodic structure (DRPS) and sphere-cylindrical focusing mirror the possibility of using wide electron beam in order to output power increase in 140...300 GHz frequency range is demonstrated. The second experimental achievement showed here is the proof of opportunity of using wide electron beam for the same purpose in 2 mm orotron with focusing mirror of complicated double-spherocylindrical shape. In the first case the maximum width of electron beam was of the order of 3 caustic radii, but in the second case the maximum width of electron beam exceeded the value of 4 caustic radii. For the first time the possibility of 20–30 % frequency tuning with the power level irregularity less than 5 dB is demonstrated in 2 mm orotron with DRPS and the same mirror.

*Keywords:* Orotрон, double-row periodic structure, open resonator, millimeter-wave range, terahertz range.



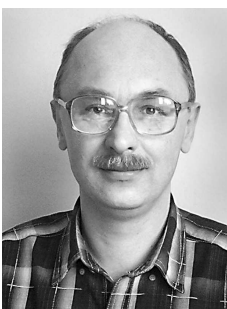
*Мясин Евгений Анатольевич* – родился в Новосибирске (1938), окончил Московский инженерно-физический институт (МИФИ, 1961). С 1962 года работает в ИРЭ АН СССР сначала в должности младшего затем старшего научного сотрудника. В 1966 году установил связь между возникновением генерации шума и нелинейным режимом ЛБВ в автогенераторе с задержанной обратной связью из двух ЛБВ, замкнутых в кольцо. Соавтор заявки на способ генерации и устройство генератора шума (Шумотрон, 1967). Защитил диссертацию на соискание степени кандидата технических наук (ИРЭ, 1970) в области радиофизики и СВЧ-электроники. Лауреат Государственной премии СССР (1980). С 1980 года по настоящее время заведующий лабораторией генерации и усиления электромагнитных волн миллиметрового диапазона в ФИРЭ АН СССР, теперь – Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук. Опубликовал (в том числе в соавторстве) 105 статей и сделал 49 докладов на Российских и Международных конференциях по направлениям, указанным выше.

141190 РФ, Московская область, Фрязино, площадь им. Введенского, д. 1  
ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
E-mail: eam168@ms.ire.rssi.ru



*Евдокимов Валерий Вячеславович* – родился в Красноярском крае (1941), окончил физический факультет Московского университета им. М.В. Ломоносова (1964). После окончания МГУ работал за рубежом. С 1966 года по настоящее время работает во Фрязинском филиале ИРЭ АН СССР, теперь ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, сначала в должности м.н.с., затем исполняющего обязанности заведующего лабораторией. В настоящее время старший научный сотрудник. Область научных интересов: физика и техника миллиметровых волн, СВЧ-электроника. Опубликовал в соавторстве 27 статей и соавтор 42 докладов на Российских и Международных конференциях по направлениям, указанным выше.

141190 РФ, Московская область, Фрязино, площадь им. Введенского, д. 1  
ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
E-mail: eam168@ms.ire.rssi.ru



*Ильин Андрей Юрьевич* – родился в Ростове-на-Дону (1966). Работает в ФИРЭ АН СССР с 1985 года. После службы в рядах Советской Армии в 1988 году вернулся на работу в ФИРЭ в лабораторию на должность старшего техника. Окончив с отличием Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА, 1993), он прошел в этой лаборатории путь от инженера до главного электроника. Высококвалифицированный специалист-экспериментатор, подготавливает сложный эксперимент (фактически собирает макеты приборов) и принимает участие в экспериментальном исследовании приборов О-типа (орotronов) коротковолновой части миллиметрового диапазона. Область научных интересов: компьютерные технологии и СВЧ-электроника. Опубликовал в соавторстве 15 статей и соавтор 36 докладов на Российских и Международных конференциях по направлениям, указанным выше.

141190 РФ, Московская область, Фрязино, площадь им. Введенского, д. 1  
ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
E-mail: eam168@ms.ire.rssi.ru