ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 3, с. 38–41

ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.385.63

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЙ МОЩНОСТИ ОРОТРОНОВ ДВУХМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

© 2025 г. Е. А. Мясин[a], *, А. Ю. Ильин[a], Н. А. Максимов[a]

[a] Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук
Россия, 141190, Фрязино, Московская обл., пл. Введенского, 1
** e-mail: eam168@ms.ire.rssi.ru*

Поступила в редакцию 27.12.2024 г.
После доработки 18.03.2025 г.
Принята к публикации 08.03.2025 г.

Предложен подход для коррекции результатов измерений выходной мощности оротронов с двухрядной периодической структурой, выполненных с помощью градуированной детекторной секции в волноводе с поперечным сечением 1.6×0.8 мм^2 с учетом расположения детектора в середине широкой стенки волновода. Приведены результаты реализации такого подхода при коррекции измерений выходной мощности оротрона двухмиллиметрового диапазона длин волн.

DOI: 10.31857/S0032816225030066

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] были проведены измерения мощности генерации оротрона с двухрядной периодической структурой (ДРПС) в диапазоне частот от 180 до 400 ГГц с помощью волноводной градуированной детекторной секции с поперечным сечением волновода 1.6×0.8 мм^2. Но поскольку этот волновод становится уже на частоте около 200 ГГц сверхразмерным, необходимо было учесть при измерениях то обстоятельство, что детектор находится в середине широкой стенки волновода, что не было сделано, так как основное внимание было направлено на увеличение верхней границы перестройки частоты. Поэтому в приложении работы [1] была установлена определенная закономерность в соотношении между волноводной длиной волны и размером широкой стенки волновода, в середине которой расположен детектор. На основе анализа этой закономерности был предложен метод учета ее влияния на результат измерения мощности генерации оротрона. Для описания этой закономерности предлагалось введение корректирующей функции F, определяющей возможное максимальное значение измеряемой величины как при совпадении ее с координатой середины широкой стенки волновода, т.е. местом расположения детектора, так и при несовпадении. В последнем случае истинное значение измеряемой величины должно определяться умножением ее на величину, обратную F, т.е. на $1/F$.

2. ТЕОРИЯ

Очевидно, что функция F должна быть тригонометрической (либо $\cos\alpha$, либо $\sin\alpha$). Как будет видно, для дальнейшего рассмотрения необходимо использовать $\sin\alpha$. Поскольку в прямоугольном волноводе с поперечным сечением $a \times b$ см^2, где a – широкая стенка волновода, поперечное распределение ВЧ-поля вдоль нее соответствует половине длины волны типа H_{10} ($\lambda_в/2$, т.е. половине периода синусоиды), положение середины широкой стенки волновода ($a/2$), где расположен детектор, соответствует величине $\lambda_в/4$. Поэтому регистрируемая мощность генерации на длине волны в свободном пространстве будет всегда иметь максимальное значение в случае совпадения ее длины волны с волноводной $\lambda_в = 2a$. Поэтому новая функция F (будем называть ее специальной) должна быть записана так:

$$F = \left|\sin\left[\left(\pi/a\right)\lambda_{в}/4\right]\right|,$$

т.е. она отражает тот факт, что максимальное значениеэтой функции, равное единице, располагается в середине широкой стенки волновода, где расположен детектор. В аргументе функции F присутствует величина π/a, так как a – половина длины волны $\lambda_{в}$ типа H_{10}.

При $\lambda_{в} = 2a$ выполняется равенство

$$\sin\left[\left(\pi/a\right)\lambda_{в}/4\right] = \sin\left[\left(\pi/a\right)2a/4\right] = 1.$$

Эта ситуация соответствует существованию одного максимального значения этой функции при этой волноводной длине волны типа H_{10} с максимумом в середине широкой стенки a волновода. Нетрудно определить эту волноводную длину волны: $\lambda_{в} = 2a = 3.2$ мм. Для всех длин волн, отличных от $\lambda_{в}$, результат измерения должен быть скорректирован, т.е. умножен на корректирующую функцию $1/F$. Таким образом, результат измерения необходимо увеличить в $1/\sin[(\pi/a)\lambda_{в}/4]$ раз. Теперь по известной формуле можно вычислить соответствующую длину волны λ_{0} в свободном пространстве:

$$\lambda_{0} = \lambda_{в}\Big/\sqrt{1+\left(\lambda_{в}/\lambda_{кр}\right)^{2}}.$$

Тогда для $\lambda_{в} = 3.2$ мм получаем значение длины волны $\lambda_{0} \approx 2.262$ мм, т.е. $f = 132.5825$ ГГц, что соответствует середине двухмиллиметрового диапазона длин волн, и это означает, что коррекция измерений будет проходить в двухмиллиметровом диапазоне, для работы в котором и предназначен волновод сечением 1.6×0.8 мм^2.

3.ЭКСПЕРИМЕНТ

Цель данного эксперимента – показать необходимость коррекции результатов измерений мощности на данной длине волны, генерируемой оротроном с ДРПС, полученных без учета уменьшения регистрируемой мощности, в зависимости от расположения максимума половины волноводной длины относительно середины широкой стенки волновода размерами 1.6×0.8 мм^2, где размещен детектор. Для определения мощности, генерируемой оротроном с ДРПС, использовалась методика работы [1]. Для расчета мощности излучения на некоторых частотах диапазона перестройки сначала измерялась мощность потерь в СВЧ-тракте между выходным фланцем вывода энергии оротрона с ДРПС и волноводной детекторной секцией (ДС), а затем с использованием градуировки ДС по значению амплитуды сигнала ДС на данной частоте определялась мощность генерируемого излучения. Важно отметить, что для использования градуировки необходимо, чтобы детектор работал в квадратичном режиме. Поскольку измерения проводились на том же экспериментальном стенде, что и в работе [1], это требование в процессе измерений неукоснительно соблюдалось, и уровень напряжения на детекторе, соответствующий границе его квадратичной работы, никогда не нарушался. Таким образом, между напряжением на детекторе и потерями мощности в волноводном тракте с помощью градуировки устанавливается линейная зависимость, и величину генерируемой мощности для нашей цели можно не вычислять, так как коррекция амплитуды эквивалентна коррекции мощности. Для примера коррекции результатов измерения мощности рассмотрим реальный процесс генерации в оротроне с ДРПС [2], схематическое изображение которого представлено на рис. 1.

Эксперимент проводился на стенде, содержащем высоковольтный источник питания и вакуумную камеру, в которой при непрерывной откачке обеспечивался высокий вакуум (давление 10^{-8}мм рт. ст.). В этой камере располагался макет оротрона. Прибор работал во внешнем магнитном поле напряженностью около 7 кГс, создаваемом электромагнитом. Напряжение подавалось от высоковольтного модулятора, обеспечивающего работу в импульсном режиме с большой скважностью (длительность импульса напряжения 2 мкс, частота следования импульсов 50 Гц). Частота генерации оротрона могла перестраиваться от 104 до 127 ГГц за счет изменения расстояния между зеркалами открытого резонатора с одновременным изменением напряжения в диапазоне от 9 до 18 кВ. Регистрация генерируемой мощности излучения проводилась с помощью наблюдения амплитуды сигнала на осциллографе с выхода градуированной волноводной детекторной секции двухмиллиметрового диапазона с поперечным сечением волновода 1.6×0.8 мм^2. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, минимальное значение корректирующей функции $1/F \approx 1$ достигается при максимальной частоте генерации $f = 127.76$ ГГц, волноводная длина волны которой имеет минимальное значение, близкое к $\lambda_{в} = 3.2$ мм.

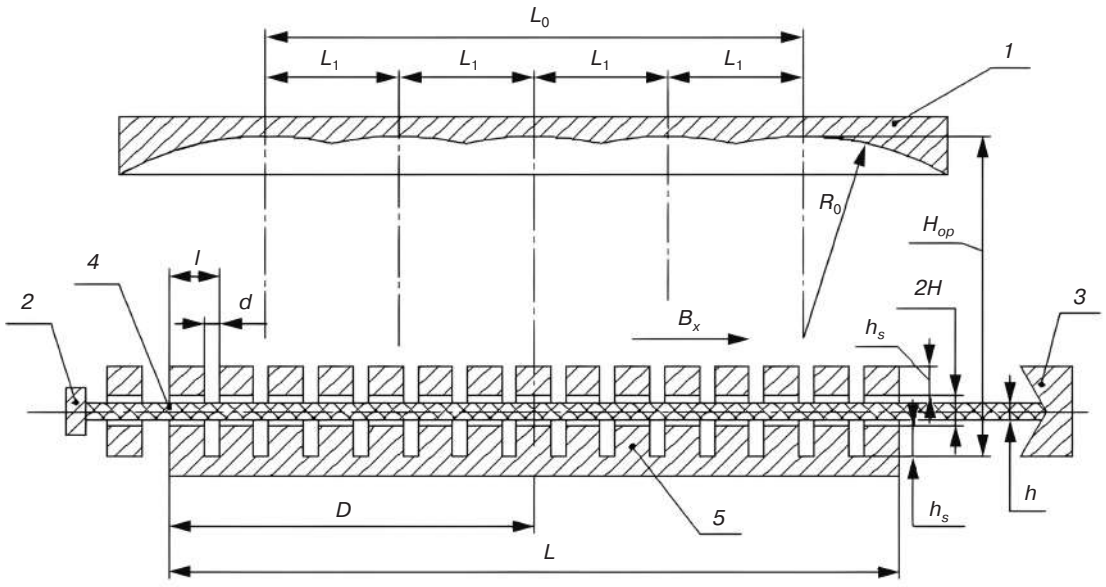

Рис. 1. Схема конструкции оротрона с фокусирующим пяти фокусным зеркалом: *1* – фокусирующее зеркало, *2* – катод, *3* – коллектор, *4* – электронный поток, *5* – двухрядная периодическая структура (ДРПС) на плоском зеркале.

Таблица 1. Результаты измерений

f, ГГц	$\lambda_в$, мм	A, мВ	$\lambda_0 = \lambda_в \Big/ \sqrt{1+\left(\lambda_в/\lambda_{кр}\right)^2}$	$F = \sin[(\pi/a)\lambda_в/4]$	$1/F$	$A_{корр} = A/F$, мВ
104	2.88	15	6.6	0.092	10.2	153
108.23	2.772	150	5.548	0.406	2.463	369.5
119	2.52	300	4.088	0.906	1.1	330
123.96	2.42	330	3.648	0.97	1.03	340
127.76	2.348	620	3.455	0.992	1.008	620

Однако необходимо проверить границу области применимости предлагаемой корректирующей функции, так как она определяется зависимостью $1/F = 1/\sin\alpha$ и может стремиться к бесконечности при малых значениях $\sin\alpha$.

Для определения области применения этой функции нужно использовать градуировку нашей детекторной секции, представленную на рис. 2.

В соответствии с градуировкой детекторной секции при $P_0 = 5$ мВт разница в чувствительности детектора на частотах 127.76 и 119 ГГц составляет около $6.2/5.7 = 1.0877 \approx 1.09$, что соответствует разнице при вычислении значений мощности (рис. 2). При корректировке измерений мощности, проведенной с помощью предлагаемой методики, эта разница в чувствительности в соответствии с табл. 1 составляет 330 мВ / 300 мВ ≈ 1.1.

Теперь и в том, и в другом случаях необходимо учесть влияние потерь в коротком волноводном тракте от выходного фланца прибора до детекторной секции. Поскольку длина волны λ_c середины диапазона обычно имеет значение $\lambda_c = 0.75a = 2.133$ мм, для низкочастотного края двухмиллиметрового диапазона для частоты 127.76 ГГц длина волны составит $\lambda = 2.34$ мм, а для частоты 119 ГГц имеем $\lambda = 2.52$ мм. Поскольку обе длины волны находятся недалеко от критической длины волны $\lambda_{кр} = 3.2$ мм ($\lambda_0 = 2.262$ мм) и близко друг к другу, потери в этом волноводном тракте на единицу длины можно считать одинаковыми.

Таким образом, можно считать, что разница между измерением потерь на частоте 119 ГГц с использованием градуированной детекторной секции (примерно в 1.09 раза) и предлагаемой методикой (1.1 раза) одинакова. Следовательно, частота 119 ГГц является граничной частотой, до которой предлагаемой методикой можно пользоваться.

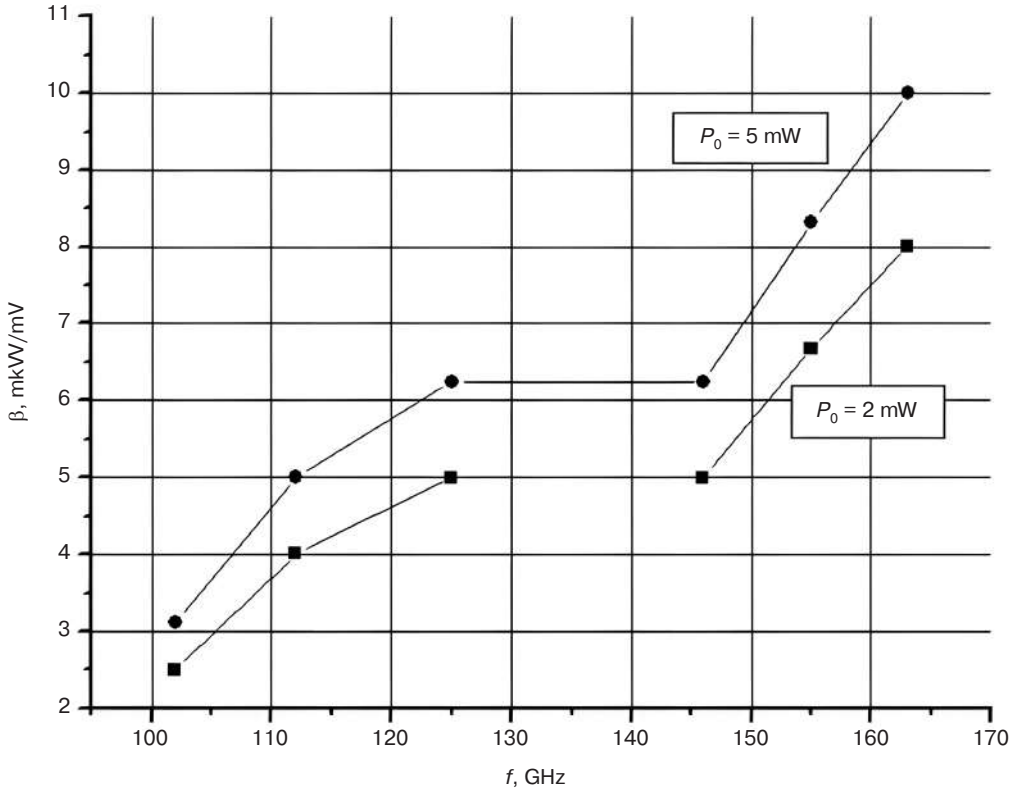

Рис. 2. Градуировка волноводной детекторной секции 1.6 × 0.8 мм^2.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из проведенного рассмотрения следует, что при широкодиапазонной перестройке источников СВЧ в двухмиллиметровом диапазоне с использованием детекторной секции с детектором в середине широкой стенки волновода нет необходимости проводить коррекцию этих измерений во всем низкочастотном диапазоне перестройки (от 127.76 до 104 ГГц), так как граница применимости предлагаемой методики ограничена частотой 119 ГГц. Но на частоте 119 ГГц эту коррекцию нужно проводить, если требуется точность измерения до 10%. Этот результат можно использовать и для коррекции измерений с помощью детекторных секций, построенных по этому принципу, в прямоугольных волноводах других диапазонов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность А.А. Негиреву за градуировку нашей детекторной секции.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю.* // ПТЭ. 2023. № 2. С. 58. https://doi.org/10.31857/S0032816223020088
2. *Мясин Е.А.* // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 9. С. 1.