

В. С. Мирошниченко, Е. А. Ковалев*

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: mirosh@ire.kharkov.ua

**Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина*

4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина

ОТКРЫТАЯ РЕЗОНАНСНАЯ СИСТЕМА С ФОКУСИРУЮЩИМ ЗЕРКАЛОМ, СОСТАВЛЕННЫМ ИЗ НЕСКОЛЬКИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Обеспечение достаточной длины пространства взаимодействия в генераторах дифракционного излучения, работающих в терагерцевом диапазоне, является актуальной задачей дифракционной электроники. Одним из способов решения этой задачи является использование в открытой резонансной системе генератора составного фокусирующего зеркала. Целью данной работы является экспериментальное исследование свойств резонансных мод в открытой резонансной системе с фокусирующим зеркалом, составленным из нескольких отражателей с цилиндрической поверхностью одинакового радиуса кривизны. Для случая H -поляризации установлены структура поля и добротность резонансных мод в полосе перестройки частоты $f = 25 \div 38$ ГГц при использовании фокусирующего зеркала, составленного из двух, трех и четырех цилиндрических отражателей. Для работы генератора дифракционного излучения на основной TEM_{00q} -моду наиболее приемлема открытая резонансная система с фокусирующим зеркалом из двух цилиндрических отражателей. При использовании фокусирующего зеркала, составленного из $n \geq 2$ цилиндрических отражателей, хорошими свойствами обладают $TEM_{(n-1)0q}$ -моды при совпадении нулей резонансного поля со стыками цилиндрических поверхностей, в частности, при $n = 2$ структура поля TEM_{10q} -моды носит супергауссовый характер. Ил. 9. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: генератор дифракционного излучения, открытая резонансная система, составное фокусирующее зеркало, супергауссовый пучок.

При укорочении рабочей длины волны в генераторах дифракционного излучения (ГДИ) возникает необходимость сохранения достаточной длины пространства взаимодействия, вдоль которого происходит энергообмен между электронным пучком и резонансным полем открытой резонансной системы (ОРС). Длина пространства взаимодействия является одним из параметров ОРС, определяющих стартовый ток в ГДИ, поэтому обеспечение достаточной длины пространства взаимодействия в ГДИ, работающих в терагерцевом (ТГц) диапазоне частот, представляет собой одну из актуальных задач современной дифракционной электроники. При использовании в ГДИ традиционной сфероцилиндрической ОРС получение достаточной длины пространства взаимодействия (пятна поля на зеркале с периодической структурой и гауссовым распределением электрического поля $E(x)$ вдоль движения электронного пучка) сопряжено с увеличением радиуса кривизны фокусирующего зеркала и ухудшением устойчивости ОРС по отношению к перекосам зеркал. Для преодоления этих трудностей еще в 1970-е гг. было предложено использовать в ОРС фокусирующее зеркало, составленное из нескольких отражателей со сфероидальной или цилиндрической поверхностью. И первые экспериментальные результаты по использованию в ГДИ фокусирующих зеркал, составленных из двух сфероидальных отражателей, показали обнадеживающие результаты [1], в том числе и для ГДИ, работающем в ТГц-диапазоне частот [2]. В последние годы было предложено в генераторах для ТГц-диапазона использовать фокусирующие зеркала, составленные из нескольких сфероидаль-

ных отражателей [3, 4]. Однако до сих пор не проведен детальный анализ особенностей возбуждения колебаний в таких ОРС и не установлено, насколько квазиоптическое моделирование структуры полей в таких ОРС отвечает действительности. Выбор расстояния между центрами кривизны поверхностей смежных зеркал-отражателей обычно основывается на предположении, что соседние пятна полей на плоской периодической структуре пересекаются на уровне E_{\max}/e . При этом на стыки соседних сфероидальных экранов попадает электрическое поле с достаточно большой амплитудой, что может привести к существенным дифракционным потерям в такой ОРС (потерям на излучение из ОРС в свободное пространство).

Для $2-D$ открытых резонаторов с произвольным профилем фокусирующего зеркала и E -поляризацией резонансных мод (E -компонента резонансного поля параллельна образующей фокусирующего зеркала) разработан строгий алгоритм расчета структуры полей [5] и проведен анализ полей в ОРС с фокусирующим зеркалом, образованным несколькими цилиндрическими отражателями, причем результаты теоретических расчетов хорошо согласуются с экспериментом [6]. Однако при E -поляризации резонансных мод в таких ОРС токи на поверхности зеркал, наведенные резонансным полем, не пересекают стыки соседних цилиндрических отражателей и дифракционные потери незначительны. Для случая H -поляризации резонансных мод в ОРС со сложным профилем фокусирующего зеркала и протяженным пространством взаимодействия в нашем распоряжении пока не имеется строгих методов расчета резонансных полей.

Цель настоящей работы – проведение экспериментальных исследований для установления особенностей структуры поля резонансных мод (случай H -поляризации) в ОРС с фокусирующим зеркалом, состоящим из нескольких отражателей с цилиндрической поверхностью, и выработка практических рекомендаций для использования таких ОРС в ГДИ.

1. Методика эксперимента. Для регистрации распределения резонансного поля вдоль пространства взаимодействия и непосредственно на поверхности зеркала исследуемой ОРС был применен метод анализа структуры поля по коэффициенту связи β резонансной моды с нагрузкой. Суть метода заключается в перемещении узла связи по пятну поля резонансной моды в ОРС. Для этого первое зеркало, на котором исследуется распределение поля резонансной моды, выбирается с достаточно большой апертурой и узлом связи (например, в виде узкой щели), размещенном в центре зеркала. Второе (фокусирующее) зеркало, составленное из нескольких цилиндрических или сфероидальных отражателей, перемещается параллельно первому зеркалу, чем и обеспечивается сканирование узла связи по пятну поля исследуемой резонансной моды (рис. 1).

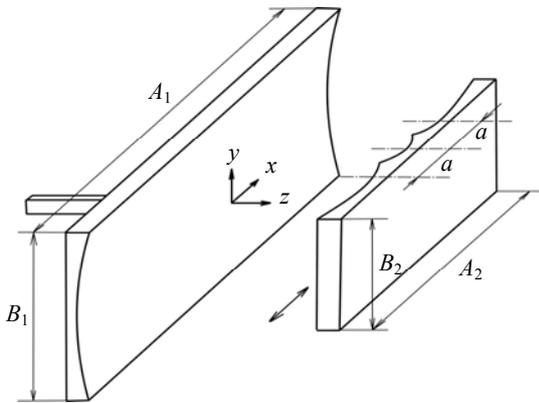


Рис. 1. Схема взаимного расположения зеркал ОРС

Зеркало, на котором исследуется распределение поля резонансной моды (первое), может быть плоским, если фокусирующее зеркало составлено из нескольких сфероидальных отражателей. Для возбуждения устойчивых мод в ОРС с фокусирующим зеркалом, составленным из нескольких цилиндрических отражателей, необходимо использовать первое зеркало в виде протяженной цилиндрической поверхности, образующая которой составляет угол 90° по отношению к образующей составного фокусирующего зеркала (рис. 1).

Относительная амплитуда поля резонансной моды на зеркале ОРС, содержащем узел

связи, может быть определена из следующего соотношения:

$$\frac{E_x(x)}{E_{x\max}} = \sqrt{\frac{\beta(x)}{\beta_{\max}}}. \quad (1)$$

Для симметричных резонансных кривых, характеризующих частотную зависимость коэффициента отражения в подводящем тракте $\Gamma(f)$, измерение зависимости $\beta(x)$ сводится к скалярным измерениям коэффициента отражения при резонансе $|\Gamma_0|$ и при отстройке от резонанса $|\Gamma_s|$ [7, 8]. Параметр $|\Gamma_s|$ описывает уровень потерь на излучение в свободное пространство для выбранного узла связи. Характер связи (большая или малая) определяется по изменению величины $|\Gamma_0|$ при внесении в объем резонансной моды дополнительного (поглощающего) пробного тела. Если поглощающее тело приводит к увеличению $|\Gamma_0|$, то коэффициент связи β вычисляется согласно (2). При уменьшении $|\Gamma_0|$, вызванным поглощающим телом, коэффициент связи β вычисляется согласно (3).

$$\beta(x) = \frac{|\Gamma_s| - |\Gamma_0(x)|}{1 + |\Gamma_0(x)|} \text{ – при малой связи}; \quad (2)$$

$$\beta(x) = \frac{|\Gamma_s| + |\Gamma_0(x)|}{1 - |\Gamma_0(x)|} \text{ – при большой связи}. \quad (3)$$

Апробация метода была проведена в ОРС с цилиндрическими зеркалами, угол между образующими которых составлял 90° . Радиус кривизны первого зеркала составлял $R_{c1} = 160$ мм (зеркало для анализа структуры поля резонансной моды вдоль оси OX), апертура зеркала – $A_1 \times B_1 = 200 \times 56$ мм², материал – медь. Радиус кривизны второго (фокусирующего) зеркала составлял $R_{c2} = 110$ мм, диаметр зеркала – 70 мм, материал – дюралюминий (рис. 1). На фиксированной частоте $f = 37,5$ ГГц были проведены измерения зависимости энергетических параметров для TEM_{00q} -моды (Q_L – нагруженная добротность, β – коэффициент связи с нагрузкой) от межзеркального расстояния (продольного индекса q) и вычислена собственная добротность TEM_{00q} -моды: $Q_0 = (1 + \beta)Q_L$. Линейный рост собственной добротности для TEM_{00q} -моды при увеличении продольного индекса q (рис. 2, а) свидетельствует о малом уровне дифракционных потерь в данной ОРС по сравнению с омическими потерями в зеркалах вплоть до $q = 8$. Следовательно, полученные значения собственной добротности Q_0 для TEM_{00q} -моды дают нам оценку омического

предела по добротности в ОРС с медным и дюралевым зеркалами. Так, для TEM_{004} -моды омический предел по добротности составил $Q_0 = 15\ 120$ на частоте $f = 37,5$ ГГц (рис. 2, а).

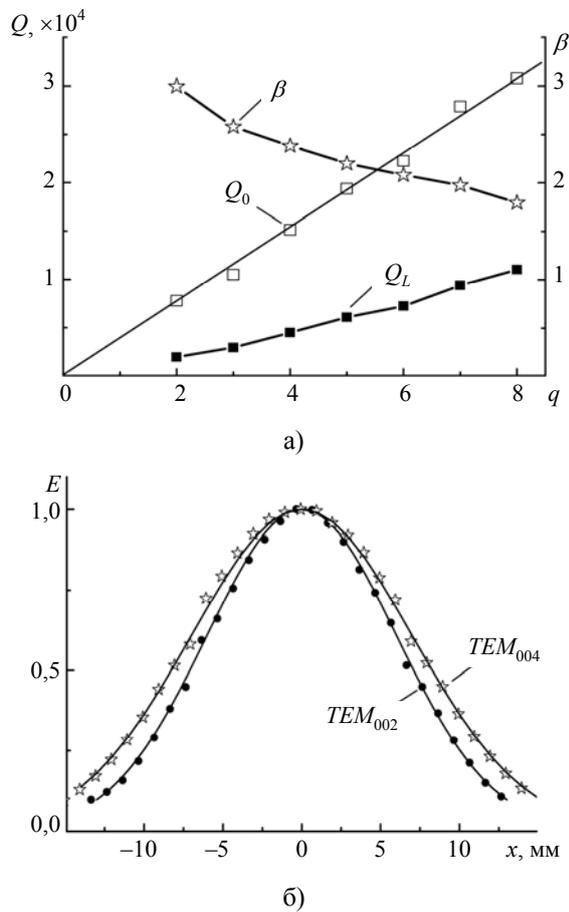


Рис. 2. Зависимость энергетических параметров TEM_{00q} -моды от продольного индекса q (а) и структура резонансных полей для TEM_{002} - и TEM_{004} -мод в ОРС с цилиндрическим фокусирующим зеркалом (б) (сплошные линии – квазиоптическое приближение)

Структура полей для TEM_{002} -моды и TEM_{004} -моды, восстановленная по экспериментальной зависимости $\beta(x)$, практически совпадает с расчетом по квазиоптическому приближению $E(x) = E_{\max} \exp(-x^2/w_{0x}^2)$ (рис. 2, б). Для квазиоптического приближения радиусы пятен поля на зеркале анализа (w_{0x}) были вычислены согласно

соотношению $w_{0x} = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} \sqrt{D(R_{c2} - D)}}$, где D – меж-

зеркальное расстояние для мод на частоте резонанса, λ – длина волны в свободном пространстве на резонансной частоте исследуемой моды. Небольшое расхождение экспериментальных данных с квазиоптическим приближением наблюдалось вблизи режима полного согласования при $|\Gamma_0(x)| \approx 0$ и вызвано снижением точности

измерений малых значений $|\Gamma_0(x)|$. Поэтому для уменьшения ошибок при измерении $E(x)$ желательно выбирать узел связи с $\beta(x) \leq 0,9$ в максимуме поля исследуемой моды в ОРС.

Для проведения экспериментальных исследований свойств резонансных мод в ОРС с фокусирующим зеркалом, составленным из нескольких отражателей с цилиндрической поверхностью, был выбран 8-мм диапазон длин волн. Полученные результаты могут быть использованы и при разработке ОРС для других частотных диапазонов при выборе тех же относительных геометрических параметров зеркал (см. рис. 1): сохранении отношения радиуса кривизны каждого из цилиндрических отражателей к длине волны R_c/λ ; выборе тех же относительных значений для расстояния между центрами кривизны составного зеркала a/λ и длины составного зеркала A_2/λ ; использовании резонансных мод с теми же индексами m и q (TEM_{m0q} -моды).

2. Фокусирующее зеркало, составленное из двух цилиндрических отражателей. Анализ распределения полей резонансных мод проводился на поверхности цилиндрического зеркала (первого) с радиусом кривизны $R_{c1} = 160$ мм и апертурой $A_1 \times B_1 = 200 \times 56$ мм². Щелевой узел связи с размерами $0,1 \times 7,2$ мм² размещался в центре зеркала, материал первого зеркала – медь. Большая длина зеркала вдоль направления регистрации структуры резонансного поля (ось OX) обеспечивала малые дифракционные потери исследуемой моды при перемещении второго (фокусирующего) зеркала ОРС. Малая ширина узла связи вдоль направления анализа ($0,1$ мм) обеспечивала высокую разрешающую способность метода при исследовании резонансного поля.

Второе (фокусирующее) зеркало было составлено из двух идентичных цилиндрических отражателей ($R_{c2} = 110$ мм), центры кривизны которых были разнесены на расстояние $a = 20$ мм. Апертура второго зеркала составляла $A_2 \times B_2 = 70 \times 60$ мм², материал – дюралюминий. Выбор радиуса кривизны цилиндрических отражателей ($R_{c2} = 110$ мм) обеспечивал для TEM_{004} -моды пересечение соседних гауссовых пятен поля вдоль направления анализа (ось OX) на уровне E_{\max}/e ($w_{0x} = 9,94$ мм при $\lambda = 8,0$ мм). Ширина составного зеркала ($B_2 = 60$ мм) обеспечивала низкий уровень дифракционных потерь для TEM_{004} -моды вдоль оси OY ($w_{0y} = 11,06$ мм на составном фокусирующем зеркале при $\lambda = 8,0$ мм).

Анализ свойств резонансных мод проведен в диапазоне частот $25 \div 38$ ГГц. В спектре ОРС

присутствует первая группа мод (TEM_{00q} , TEM_{10q} , TEM_{20q} , TEM_{30q}), из них две моды имеют высокую добротность (TEM_{00q} и TEM_{10q}), а также наблюдается возбуждение высших мод (TEM_{m1q} , TEM_{m2q}) которые существенно разнесены по частоте от первой группы мод. Основное внимание уделялось исследованию характеристик TEM_{004} -моды, для которой были выбраны параметры составного зеркала (R_{c2} , a), обеспечивающие на частоте $f = 37,5$ ГГц пересечение соседних пятен полей на уровне E_{\max}/e . В эксперименте регистрировались параметры Q_L и β , а для сравнения энергетических характеристик возбуждаемых мод выбран параметр $Q_0 = (1 + \beta)Q_L$, который не зависит от места расположения узла связи на зеркале ОРС.

Для TEM_{004} -моды высокая добротность наблюдалась в полосе частот $f = 32,5 \div 36,5$ ГГц с максимумом добротности $Q_0 = 4450$ на частоте $f = 36,0$ ГГц. Для TEM_{104} -моды высокая добротность наблюдалась в полосе частот $f = 35 \div 38$ ГГц с максимальной добротностью $Q_0 = 10380$, приближающейся к омическому пределу. Отметим, что во всем диапазоне перестройки данной ОРС добротность TEM_{104} -моды в 2–4 раза выше, чем добротность основной TEM_{004} -моды (рис. 3).

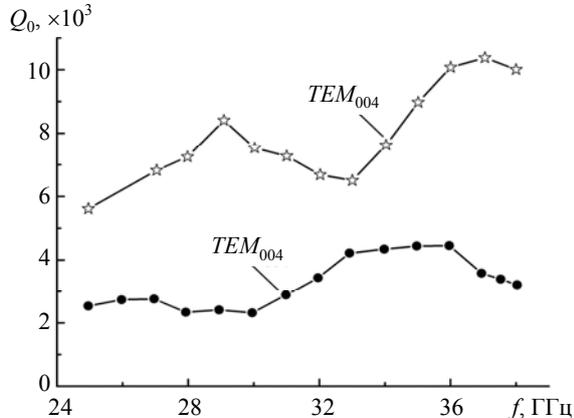


Рис. 3. Изменение собственной добротности TEM_{004} - и TEM_{104} -мод по диапазону перестройки ОРС с фокусирующим зеркалом из двух цилиндрических отражателей

Рассмотрим измеренную в эксперименте структуру поля TEM_{004} -моды на нескольких частотах диапазона перестройки. На верхнем участке диапазона перестройки (рис. 4, а) суммарное поле, сформированное соседними цилиндрическими отражателями, практически соответствует квазиоптическому приближению

$$\frac{E(x)}{E_{\max}} = \exp\left(-\frac{(x-10)^2}{w_{0x}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(x+10)^2}{w_{0x}^2}\right). \quad (4)$$

На внешних краях составного зеркала наблюдается более быстрый спад амплитуды резонансного поля по сравнению с квазиоптической оценкой. При увеличении межзеркального расстояния D происходит уменьшение резонансной частоты для TEM_{004} -моды и увеличение радиуса пятна поля w_{0x} , сформированного одним отражателем (рис. 4, б, в). При этом уменьшается глубина провалов для $E(x)$ в средней области пространства взаимодействия. Спад амплитуды резонансного поля на внешних краях зеркала тоже происходит быстрее, чем по оценке (4), т. е. резонансное поле TEM_{004} -моды уже носит супергауссовый характер. Суммарная длина пространства взаимодействия L на уровне E_{\max}/e составила:

- $L = 3,72 w_{0x} = 36,9$ мм на частоте $f = 37,5$ ГГц;
- $L = 3,26 w_{0x} = 38,1$ мм на частоте $f = 30,0$ ГГц;
- $L = 3,06 w_{0x} = 40,6$ мм на частоте $f = 24,97$ ГГц.

Рассмотрим структуру резонансного поля нечетной TEM_{104} -моды в ОРС с фокусирующим зеркалом из двух цилиндрических отражателей, измеренную на нескольких частотах диапазона перестройки (рис. 4, г–е, где для удобства графического отображения приведены нормированные значения $|E(x)|$). Поле TEM_{104} -моды носит супергауссовый характер и хорошо описывается следующим приближением:

$$\frac{E(x)}{E_{\max}} = \frac{x}{w_{sx}} \exp\left(-\left|\frac{x}{w_{sx}}\right|^s\right). \quad (5)$$

Параметры супергауссового распределения (показатель степени s и радиус супергауссового пятна поля w_{sx}) определялись при аппроксимации экспериментальных данных согласно (5) и составляли: $s = 3,2$, $w_{sx} = 1,64 w_{0x} = 16,5$ мм на частоте $f = 37,69$ ГГц (рис. 4, г); $s = 3,2$, $w_{sx} = 1,54 w_{0x} = 18,0$ мм на частоте $f = 29,97$ ГГц (рис. 4, д); $s = 3,0$, $w_{sx} = 1,48 w_{0x} = 19,6$ мм на частоте $f = 24,95$ ГГц (рис. 4, е).

Амплитуда электрического поля нечетной TEM_{104} -моды на стыке цилиндрических отражателей обращается в нуль, что способствует резкому снижению дифракционных потерь в ОРС и приближению собственной добротности данной моды к омическому пределу (рис. 2, а).

Супергауссовый спад резонансного поля TEM_{104} -моды на краях апертуры зеркал позволяет создавать малогабаритные ОРС с протяженным пространством взаимодействия. Преимущества при использовании нечетных гауссовых мод в двухкаскадном ГДИ уже были проверены теоретически и экспериментально в работах [9, 10].

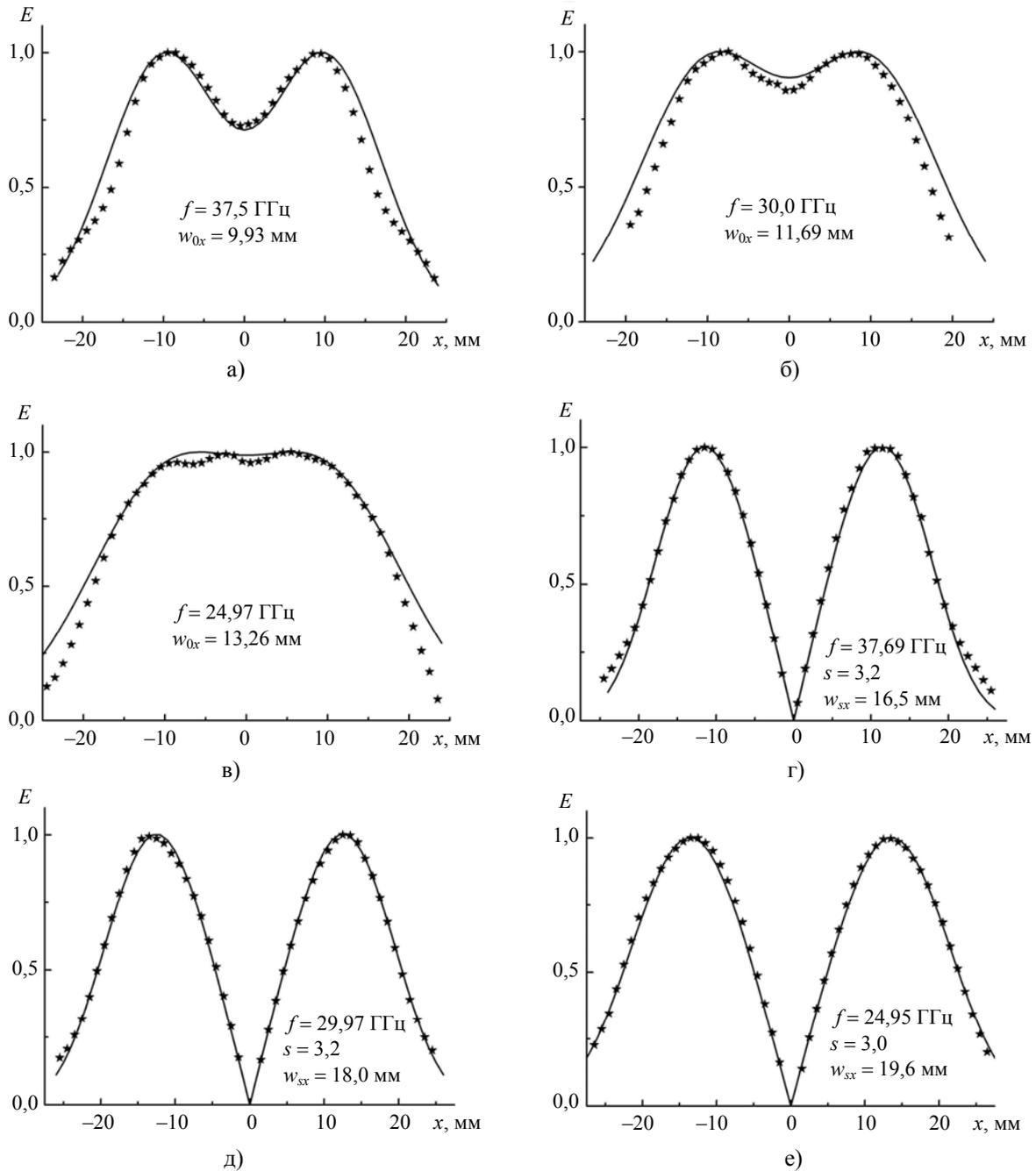


Рис. 4. Структура поля TEM_{004} -моды (а–в) и TEM_{104} -моды (г–е) на нескольких рабочих частотах в ОРС с фокусирующим зеркалом из двух цилиндрических отражателей (сплошными линиями представлено распределение поля мод, рассчитанное согласно приближениям (4) и (5))

Мода TEM_{104} более устойчива к перекосу зеркал ОРС по сравнению с TEM_{004} -модой. Так, при перекосе зеркал ОРС на угол $\varphi = 0,08^\circ$ перепад между максимумами поля TEM_{004} -моды на частоте $f = 37,2$ ГГц составил 24 %, а для TEM_{104} -моды перепад между максимумами поля составлял всего 15 % (рис. 5).

При выборе TEM_{10q} -моды в качестве рабочей моды для ГДИ необходимо обеспечить в ОРС

подавление (снижение добротности) близлежащей по частоте TEM_{00q} -моды. С этой целью нами проведено исследование свойств ОРС, в которой на стыке цилиндрических отражателей образован плоскопараллельный зазор шириной h . Через этот зазор будет происходить эффективное высвечивание энергии резонансного поля TEM_{00q} -моды. Для TEM_{10q} -моды поле на стыке отражателей близко к нулю и зазор не должен приводить к дополнительным радиационным потерям.

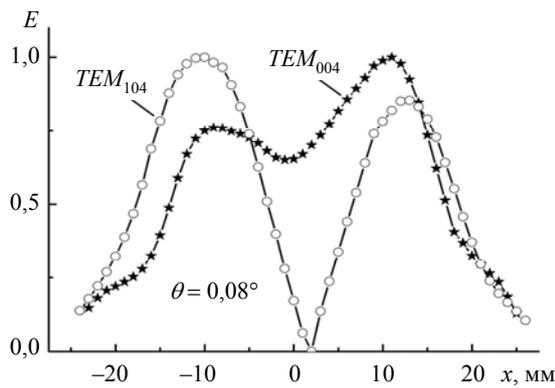


Рис. 5. Изменение структуры поля TEM_{004} - и TEM_{104} -мод при перекосе зеркал ОРС на угол $\varphi = 0,08^\circ$

На рис. 6 приведены экспериментальные данные, иллюстрирующие характер изменения добротности TEM_{00q} - и TEM_{10q} -мод на частоте $f = 36,5$ ГГц в зависимости от ширины плоскопараллельного зазора h между цилиндрическими отражателями составного зеркала. Так, для TEM_{004} -моды добротность снижается с $Q_0 = 4\,030$ до $Q_0 = 550$ при введении зазора шириной $h = 0,50$ мм (рис. 6, а).

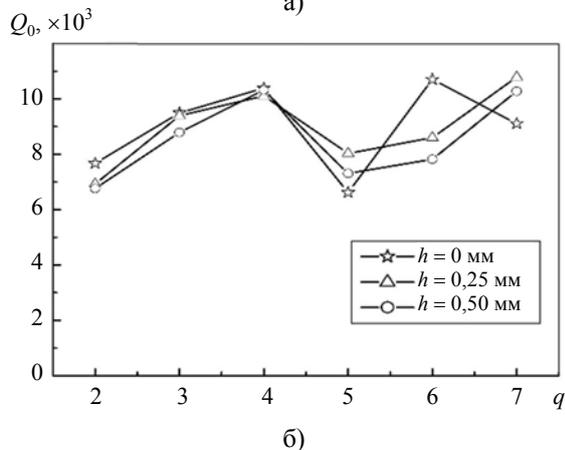
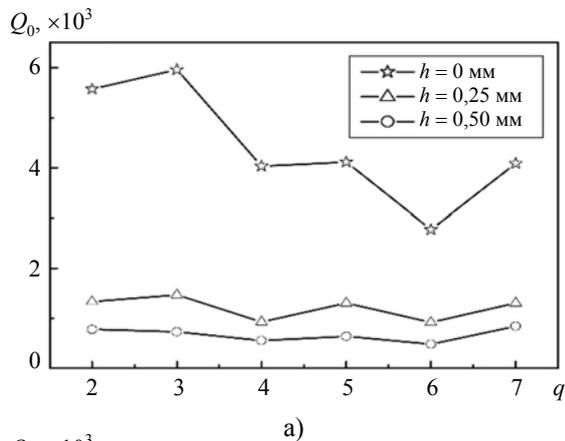


Рис. 6. Зависимость добротности для TEM_{00q} -моды (а) и TEM_{10q} -моды (б) от ширины зазора h между цилиндрическими отражателями составного фокусирующего зеркала

В то же время добротность TEM_{104} -моды при зазоре $h = 0,50$ мм остается практически неизменной $Q_0 = 10\,320$ (рис. 6, б). Наблюдаемое снижение добротности для TEM_{006} - и TEM_{105} -мод, по видимому, связано с вырождением мод в ОРС, влияние которого уменьшалось при введении зазора между цилиндрическими отражателями.

3. Фокусирующее зеркало, составленное из трех цилиндрических отражателей. Радиус кривизны каждого отражателя составного зеркала составлял $R_{c2} = 110$ мм, расстояние между соседними центрами кривизны отражателей – $a = 20$ мм, апертура составного зеркала – $A_2 \times B_2 = 90 \times 60$ мм², материал зеркала – дюралюминий. В спектре ОРС присутствуют первая группа мод (TEM_{00q} , TEM_{10q} и TEM_{20q}) с близкими резонансными частотами и ряд высших мод с низкой добротностью, разнесенных по частоте от первой группы мод. Для TEM_{004} -моды максимальная собственная добротность ($Q_{\max} = 6\,540$) наблюдалась в полосе частот $f = 36 \div 37$ ГГц, а для TEM_{204} -моды максимальная добротность наблюдалась в полосе частот $f = 36 \div 38$ ГГц и составляла $Q_{\max} = 7\,360$ (рис. 7). Мода TEM_{104} имела немного ниже добротность ($Q_0 = 4\,300$ на частоте $f = 36,62$ ГГц) вследствие рассеяния резонансного поля на стыках цилиндрических отражателей.

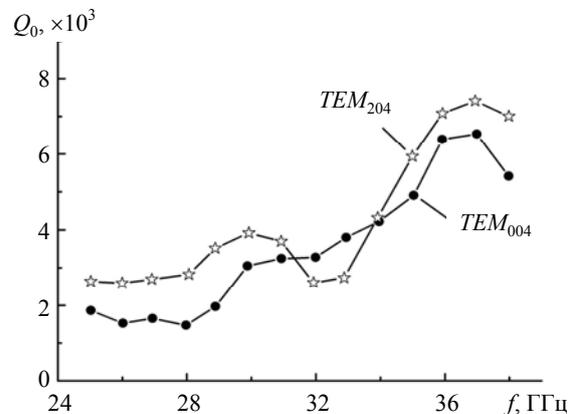


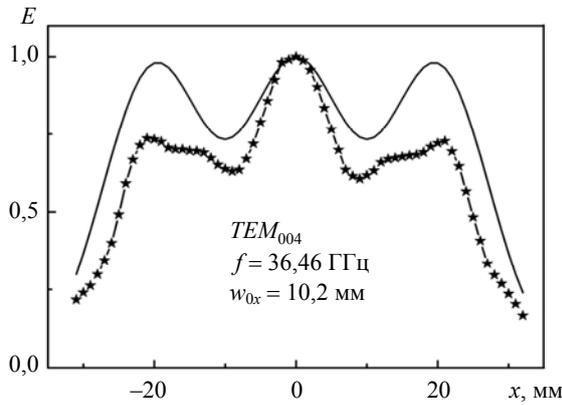
Рис. 7. Изменение собственной добротности TEM_{004} - и TEM_{204} -мод по диапазону перестройки ОРС с фокусирующим зеркалом из трех цилиндрических отражателей.

Полученные экспериментальные данные по структуре поля TEM_{004} -моды существенно отличаются от квазиоптической суммы гауссовых полей, сформированных соседними отражателями (рис. 8, а, б).

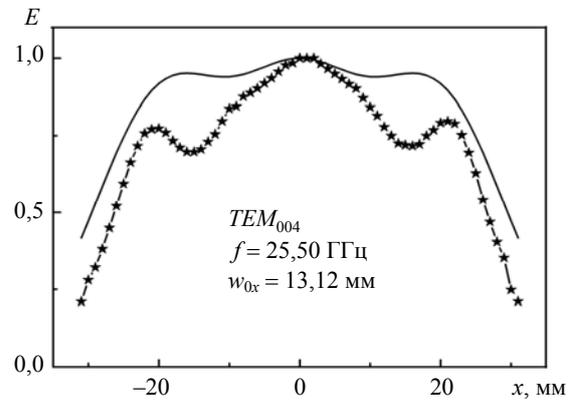
Боковые максимумы для $E(x)$ меньше на 20–30 % от центрального максимума, суммарная длина пространства взаимодействия на уровне $0,5E_{\max}$ меньше на 15–20 % от расчетной (рис. 8, а).

Провалы в амплитудном распределении для $E(x)$ достигают 38 % вблизи стыков цилиндрических отражателей, т. е. задача получения протяженной области взаимодействия с однородным полем на TEM_{00q} -моды в такой ОРС является проблематичной. Суммарная длина пространства взаимо-

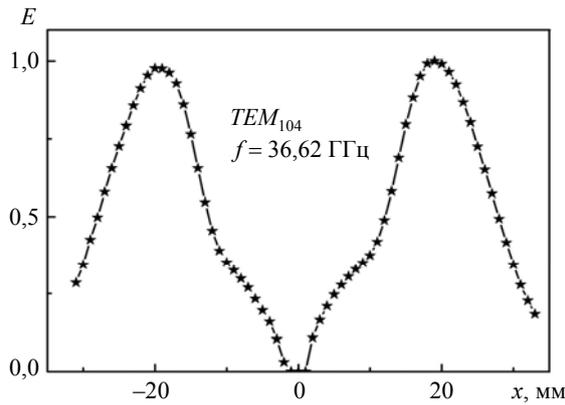
действия L для TEM_{004} -моды на уровне E_{\max}/e составила: $L = 5,20 w_{0x} = 53,1$ мм на частоте $f = 36,46$ ГГц; $L = 4,74 w_{0x} = 55,2$ мм на частоте $f = 30,09$ ГГц; $L = 4,32 w_{0x} = 57,0$ мм на частоте $f = 25,5$ ГГц.



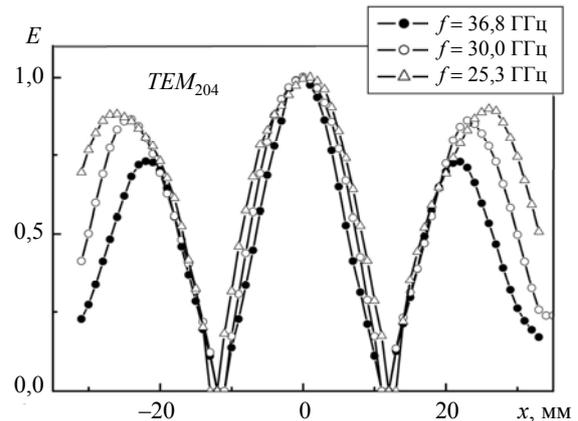
а)



б)



в)



г)

Рис. 8. Структура полей в ОРС с фокусирующим зеркалом из трех цилиндрических отражателей для основной TEM_{004} -моды (а, б) (сплошные линии соответствуют квазиоптической оценке) и для высших мод TEM_{104} (в), TEM_{204} (г)

Распределение $|E(x)|$ для TEM_{104} -моды (рис. 8, в) сильно искажено за счет попадания стыков цилиндрических поверхностей ($x = \pm 10,0$ мм) в резонансное поле с большой амплитудой, и скорее всего, эта мода не представляет практического интереса. Благодаря совпадению стыков цилиндрических поверхностей с минимумами резонансного поля TEM_{204} -моды структура поля обладает устойчивостью при перестройке частоты, а боковые максимумы в распределении $|E(x)|$ по амплитуде даже приближаются к центральному на нижней частоте диапазона перестройки (рис. 8, г). Высокая добротность TEM_{204} -моды на частоте $f = 37,0$ ГГц (рис. 7), по-видимому, мо-

жет быть еще улучшена в данной ОРС при увеличении расстояния между центрами кривизны соседних цилиндрических поверхностей до $a = 24$ мм, что обеспечит более точное совпадение стыков цилиндрических поверхностей с нулями резонансного поля. Протяженное пространство взаимодействия, организованное на TEM_{204} -моды в исследуемой ОРС, может быть с успехом использовано в 3-каскадном ГДИ. При этом для синхронизации движения электронного пучка с полем противофазных зон в распределении $E(x)$ необходимы две сдвигки периода в дифракционной решетке вблизи нулей поля TEM_{204} -моды [9].

4. Фокусирующее зеркало, составленное из четырех цилиндрических отражателей. Радиус кривизны цилиндрических отражателей составного зеркала составлял $R_{c2} = 110$ мм, расстояние между центрами кривизны соседних отражателей – $a = 20$ мм, апертура составного зеркала – $A_2 \times B_2 = 110 \times 60$ мм², материал зеркала – дюралюминий. В спектре ОРС присутствуют четыре моды TEM_{00q} , TEM_{10q} , TEM_{20q} и TEM_{30q} с близкими резонансными частотами и ряд высших мод, разнесенных по частоте от первой группы мод. При межзеркальном расстоянии $D = 16,8$ мм собственные добротности для первой группы мод составляли: $Q_{004} = 5\,010$ ($f_{004} = 36,81$ ГГц), $Q_{104} = 6\,290$, $Q_{204} = 6\,630$, $Q_{304} = 6\,700$. Относительно высокая добротность высших мод объясняется существенным увеличением общего объема резонансного поля в данной ОРС и, как следствие, снижением влияния дифракционных потерь на краях фокусирующего зеркала.

Для структуры поля TEM_{004} -моды (рис. 9, а) характерно наличие более глубоких провалов в распределении $E(x)$, а также снижение амплитуды крайних максимумов поля на 15 % по сравнению с квазиоптической оценкой. Суммарная длина пространства взаимодействия для TEM_{004} -моды на уровне E_{\max}/e составила $L = 7,36 w_{0x} = 74,4$ мм на частоте $f = 36,78$ ГГц. Отметим также слабую устойчивость ОРС к перекосам зеркал при работе на TEM_{004} -моду.

Положительным фактом являются все же меньшие перепады в распределении $E(x)$ для TEM_{004} -моды вдоль пространства взаимодействия, чем в ОРС с фокусирующим зеркалом из трех цилиндрических отражателей. Можно предположить, что при использовании фокусирующего зеркала, составленного из $N > 4$ цилиндрических отражателей, структура резонансного поля вдоль пространства взаимодействия будет более равномерной, а именно в распределении $E(x)$ одинаковую амплитуду будут иметь $N - 2$ максимума в средней части пространства взаимодействия, и только крайние максимумы будут с меньшей амплитудой и слегка искаженной формой.

Распределение поля $E(x)$ для моды TEM_{104} сильно деформировано вследствие попадания резонансного поля с большой амплитудой на стыки цилиндрических поверхностей фокусирующего зеркала. Для моды TEM_{204} наблюдается провал в распределении $|E(x)|$ вблизи $x = 0$ (рис. 9, б). Наилучшие характеристики в данной ОРС имеет TEM_{304} -мода (рис. 9, в): нули резонансного поля размещены вблизи стыков цилиндрических

поверхностей; достаточно высокая собственная добротность моды $Q_0 = 6\,700$; гладкие кривые для распределения $E(x)$ с быстрым затуханием поля на краях апертуры зеркал; хорошая устойчивость структуры поля TEM_{304} -моды к перекосам зеркал ОРС.

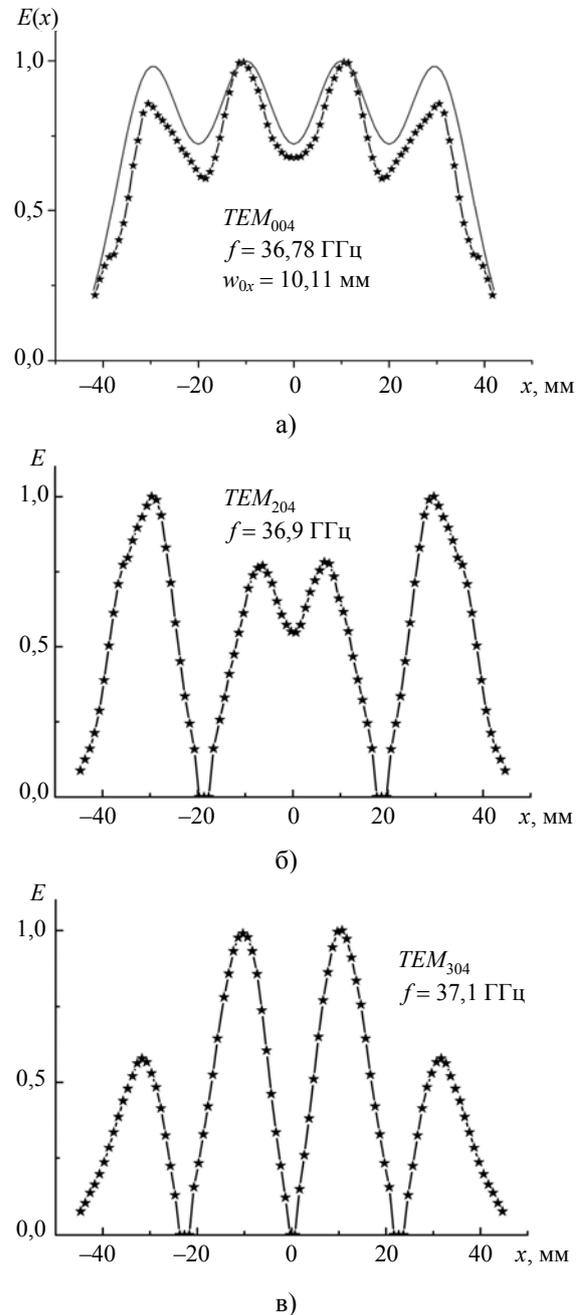


Рис. 9. Структура полей в ОРС с фокусирующим зеркалом из четырех цилиндрических отражателей для основной TEM_{004} -моды (а) и для высших мод TEM_{204} (б), TEM_{304} (в)

Выводы. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить реальную структуру протяженных полей в ОРС, ис-

пользующих составные цилиндрические зеркала при H -поляризации полей резонансных мод. Надежды на получение в таких ОРС почти однородного поля для основной TEM_{00q} -моды не оправдались, реальная структура поля основной TEM_{00q} -моды далека от квазиоптических расчетов и сильно изменяется при перекосе зеркал.

Для ОРС с фокусирующим зеркалом из двух цилиндрических поверхностей распределение поля основной TEM_{004} -моды наиболее близко к квазиоптическим расчетам во всем диапазоне перестройки ($25 \div 38$ ГГц), в то же время распределение поля этой моды сильно изрезано в ОРС с фокусирующим зеркалом из трех и четырех цилиндрических поверхностей и существенно отличается от квазиоптических расчетов.

Распределение поля для TEM_{104} -моды в ОРС с фокусирующим зеркалом из двух цилиндрических поверхностей имеет супергауссовый характер с показателем степени в экспоненте $s = 3,2$. Во всем диапазоне перестройки мода TEM_{104} имеет добротность $Q_0 > 6\,000$, которая приближается к омическому пределу на частотах $f = 36 \div 38$ ГГц. Работа ОРС на TEM_{104} -моды может быть с успехом использована в 2-каскадном ГДИ со сдвижкой нарезки периода дифракционной решетки в середине пространства взаимодействия. При необходимости в такой ОРС имеется возможность осуществить эффективное подавление TEM_{004} -моды при введении параллельного зазора между смежными цилиндрическими поверхностями фокусирующего зеркала.

В ОРС с фокусирующим зеркалом, составленным из $n > 2$ цилиндрических поверхностей, хорошими характеристиками (добротность, структура поля, устойчивость к перекосу зеркал) обладают $TEM_{(n-1)0q}$ -моды при совпадении нулей резонансного поля со стыками цилиндрических поверхностей.

Полученные результаты могут быть использованы в других частотных диапазонах при выборе таких же относительных параметров ОРС: сохранении отношения радиуса кривизны каждого из цилиндрических отражателей к длине волны R_c/λ ; выборе тех же относительных значений для расстояния между центрами кривизны составного зеркала a/λ и длины составного зеркала A_2/λ ; использовании для работы TEM_{m0q} -мод с теми же индексами m и q .

Библиографический список

1. Корнеев В. К. Генератор дифракционного излучения миллиметрового диапазона с открытым резонатором из спаренных цилиндрических зеркал / В. К. Корнеев, В. П. Шестопалов // Изв. вузов. Радиофизика. – 1977. – 20, № 1. – С. 134–138.

2. Низковольтный субмиллиметровый генератор дифракционного излучения / В. Г. Курин, И. Д. Ревин, Б. К. Скрынник, В. П. Шестопалов // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1978. – № 4. – С. 332–334.
3. Мясин Е. А. Оротрон на длину волны 1 мм на второй пространственной гармонике двухрядной периодической структуры / Е. А. Мясин, Е. Н. Соловьев // Радиотехника. – 2009. – № 3. – С. 108–113.
4. Мясин Е. А. Оротрон с двухрядной периодической структурой диапазона 140...300 ГГц / Е. А. Мясин, В. В. Евдокимов, А. Ю. Ильин // Радиотехника и электрон. – 2011. – 56, № 4. – С. 454–467.
5. Открытый резонатор с прямоугольной канавкой на зеркале, теория и эксперимент / М. Ю. Демченко, В. К. Корнеев, В. С. Мирошниченко и др. // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2000. – 5, № 3. – С. 19–28.
6. Miroshnichenko V. S. Formation of Super-Gaussian Fields in Open Two-Mirror Resonators / V. S. Miroshnichenko, V. G. Dudka, D. V. Yudinsev // 20th Intern. Crimean Conf. Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2010). – Sevastopol, 2010. – P. 247–248.
7. Miroshnichenko V. S. Experimental Determination of Equivalent Circuit Parameters of an Open Resonator Coupled to Transmission Lines / V. S. Miroshnichenko, E. B. Senkevich // Telecommunications and Radio Engineering. – 2003. – 60, N 1&2. – P. 45–60.
8. Мирошниченко В. С. Скалярный метод измерения коэффициента связи ГДИ с нагрузкой / В. С. Мирошниченко, Е. Б. Сенкевич // Материалы 16-й Междунар. Крымской конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2006). – Севастополь, 2006. – Т. 2. – С. 263–264.
9. Mode Excitation in a Generator of Diffraction Radiation with a Multistage Interaction Space / V. S. Miroshnichenko, E. B. Senkevich, A. G. Pivovarova, D. V. Yudinsev // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2010. – 53, N 3. – P. 182–190.
10. Miroshnichenko V. S. Diffraction Radiation Oscillator with Multistage Interaction Space / V. S. Miroshnichenko, A. G. Pivovarova // 18th Intern. Crimean Conf. Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2008). – Sevastopol, 2008. – P. 185–186.

Рукопись поступила 19.06.2014.

V. S. Miroshnichenko, E. A. Kovalev

OPEN RESONANT SYSTEM WITH FOCUSED MIRROR, COMPOSED OF SEVERAL REFLECTORS WITH CYLINDRICAL SURFACE

Obtaining the sufficient interaction length in diffraction radiation oscillators, which are working on THz-frequencies, is the actual problem of diffraction electronics. One of the ways to resolve this problem is the use of composed focused mirror in the open resonant system. The work goal is the experimental investigations of the resonant modes properties in open resonant system with focused mirror, composed of several cylindrical reflectors, having the same radius of curvature. For H -polarization of modes the field distributions and Q -factor on frequencies $f = 25 \div 38$ GHz are obtained, when the focused mirror was composed of two, three and four cylindrical reflectors. The use of the focused mirror, composed of 2 reflectors, is more attractive for diffraction radiation oscillator working on TEM_{00q} -resonant mode. When the focused mirror is composed of $n \geq 2$ cylindrical reflectors, the best properties are obtained for $TEM_{(n-1)0q}$ -modes, when having the null of resonant field near the attachment of reflectors. So, when $n = 2$ the field distribution of TEM_{10q} -mode is supergaussian.

Key words: diffraction radiation oscillator, open resonant system, composed focused mirror, supergaussian beam.

В. С. Мірошніченко, Є. О. Ковальов

ВІДКРИТА РЕЗОНАНСНА СИСТЕМА
З ФОКУСУЮЧИМ ДЗЕРКАЛОМ,
ЩО СКЛАДАЄТЬСЯ З ДЕКІЛЬКОХ
РЕФЛЕКТОРІВ З ЦИЛІНДРИЧНОЮ
ПОВЕРХНЕЮ

Забезпечення достатньої довжини простору взаємодії в генераторах дифракційного випромінювання, що працюють в терагерцовому діапазоні, є актуальною задачею дифракційної електроніки. Одним із способів розв'язання цієї задачі є використання у відкритій резонансній системі генератора з'явного фокусуєчого дзеркала. Мета даної роботи – це експериментальне дослідження властивостей резонансних мод у відкритій резонансній системі із фокусуєчим дзеркалом,

складеного із декількох рефлекторів з циліндричною поверхнею однакового радіуса кривизни. Для випадку H -поляризації встановлено структуру поля та добротність резонансних мод у смузі перестроювання частоти $f = 25\div 38$ ГГц при використанні фокусуєчого дзеркала, що складається з двох, трьох і чотирьох циліндричних рефлекторів. Для роботи генератора дифракційного випромінювання на основній TEM_{00q} -моді найбільш прийнятна відкрита резонансна система з фокусуєчим дзеркалом із двох циліндричних рефлекторів. При використанні фокусуєчого дзеркала, що складається із $n \geq 2$ циліндричних рефлекторів, добрі властивості мають $TEM_{(n-1)0q}$ -моди при співпаданні нулів резонансного поля зі стиками циліндричних поверхонь, зокрема, при $n = 2$ структура поля TEM_{10q} -моди має супергаусовий характер.

Ключові слова: генератор дифракційного випромінювання, відкрита резонансна система, складене фокусуєче дзеркало, супергаусовий пучок.