

УДК 537.82

КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ ТРЁХЗЕРКАЛЬНЫЙ ЭШЕЛЕТТНЫЙ РЕЗОНАТОР БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ С ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ: ДИФРАКЦИОННАЯ ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

С. Н. Власов^{1*}, *С. В. Катин*², *Е. В. Копосова*¹, *Л. В. Лубяко*¹, *Л. И. Прокофьев*²

¹ Институт прикладной физики РАН;

² Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю. Е. Седакова, г. Нижний Новгород, Россия

Построена теория трёхзеркального эшелеттного резонатора бегущей волны с перестройкой частоты, одно из зеркал которого представляет собой эшелеттную дифракционную отражательную решётку. Теория позволяет учесть дифракционные потери, связанные с конечным размером зеркал, потери, обусловленные существованием зеркального лепестка на решётке (потери на связь), и омические потери. Показана возможность существенного разрежения спектра собственных частот резонатора. Структура полей мод позволяет осуществить эффективный ввод излучения в резонатор. Эксперимент в диапазоне частот вблизи 140 ГГц подтвердил теоретические расчёты.

ВВЕДЕНИЕ

Открытые резонаторы с достаточно редким спектром собственных колебаний широко используются в миллиметровом диапазоне длин волн как в качестве резонансных систем генераторов — гиротронов и оротронов, так и в качестве резонансных волномеров, фильтров, диплексеров [1–6]. Однако селекция мод в них часто оказывается недостаточной. Использование дифракционных решёток в качестве зеркал в резонаторах бегущей волны [3–5], где для организации обратной связи (получения резонансной моды) используется 0-й (зеркальный) максимум дифракции, излучение в котором почти не имеет угловой дисперсии, не позволяет существенно улучшить селективность. Повышение селективности открытых резонаторов может быть достигнуто путём использования эшелеттных¹ [7–10] отражательных решёток, когда для организации обратной связи используется (–1)-й максимум дифракции, излучение в котором имеет большую угловую дисперсию.

В работе излагаются результаты теоретического и экспериментального (в диапазоне частот вблизи 140 ГГц) исследования трёхзеркального эшелеттного резонатора бегущей волны, идея построения которого была высказана в работе [11]. В этом резонаторе для организации обратной связи используется (–1)-й максимум дифракции, но при высокой селекции сохраняется режим бегущей волны в отличие от известных ранее двухзеркальных эшелеттных резонаторов [2, 10]. Режим бегущей волны является предпочтительным как для сохранения высокой эффективности взаимодействия с активной средой (электронным пучком в гиротронах), так и для эффективности ввода и вывода излучения из резонатора при использовании последнего в качестве фильтра

* vlasov@appl.sci-nnov.ru

¹ В классическом понимании эшелетт — это отражательная дифракционная решётка треугольного профиля, способная концентрировать дифрагированное излучение в спектре одного порядка. Обобщённое понятие эшелетта подразумевает гофрированную структуру со сложным профилем гофра (необязательно треугольного типа), обеспечивающим практически полное отражение в требуемом направлении и в желаемой частотной полосе. Селективные свойства устройства, использующего эшелетт, обеспечиваются высокой концентрацией излучения в узкой спектральной области. Степень концентрации энергии и ширина этой области спектра определяются формой профиля гофра и угловой дисперсией решётки.

или диплексера. Связь резонатора с трактом осуществляется с помощью синусоидальной фазовой дифракционной решётки в виде гофрированного зеркала. Это зеркало является общим для резонатора и подводящего тракта, а параметры гофрировки рассчитаны так, чтобы обеспечить требуемую связь при заданной геометрии рассеяния. Преимущество использования отражательной дифракционной решётки — возможность возбуждения резонатора на одной из собственных мод решётки, являющейся также и собственной модой подводящей линии. Кроме того, решётки позволяют работать с мощным (мегаваттного уровня) излучением, что успешно продемонстрировано в работе [4]. Использование решётки с (-1) -м дифракционным максимумом, в который рассеивается более 0,95 мощности падающего излучения (в описываемом эксперименте), требует строгого решения задачи дифракции волны на решётке, что является важной частью теории резонатора.

1. ОПИСАНИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗОНАТОРА

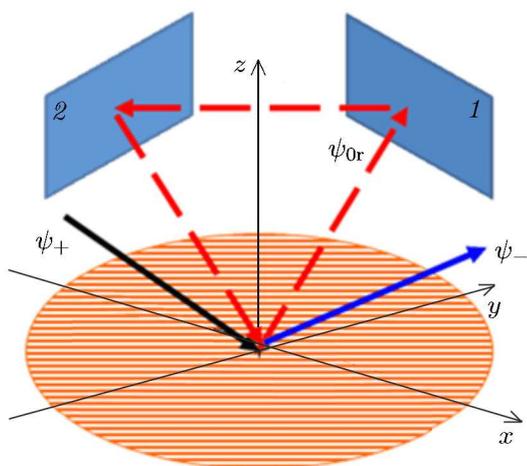


Рис. 1. Схема квазиоптического трёхзеркального эшелетного резонатора, образованного дифракционной решёткой и двумя зеркалами 1 и 2: ψ_+ — поле входного луча, ψ_{0r} — поле луча, отражённого в зеркальном направлении, и ψ_- — поле дифракционного луча

H , у которой проекция вектора напряжённости магнитного поля на плоскость решётки параллельна её гребням. В предлагаемой конструкции поляризация волны при отражении от гладких зеркал сохраняется. Это позволяет разделить моды резонатора на моды E и H в зависимости от того, какой вектор (магнитный или электрический) параллелен рёбрам решётки.

Падающий на решётку пучок с заданной поляризацией (магнитной или электрической) ψ_σ делится ей на два пучка (см. рис. 1), соответствующие (-1) -му порядку дифракции,

$$\psi_{-\sigma} = R_\sigma \psi_{+\sigma}, \quad (1)$$

и 0-му порядку дифракции,

$$\psi_{0r,\sigma} = T_\sigma \psi_{+\sigma}. \quad (2)$$

Здесь $\sigma = E, H$. Коэффициенты рассеяния решётки R_σ и T_σ находятся в результате решения задачи о рассеянии волн на гофрированной структуре. Как показано в работах [9, 12–14], используя

Эшелетный резонатор бегущей волны в простейшем случае представляет собой трёхзеркальный открытый резонатор (рис. 1), имеющий одно гофрированное и два гладких плоских или параболических зеркала. Анализ резонатора проводится в квазиоптическом приближении: ширина пучка волн и расстояние между зеркалами гораздо больше длины волны.

Решётка является аналогом мостового соединения и имеет два развязанных один от другого входа и два выхода. Она представляет собой плоскую металлическую пластину, одна из сторон которой гофрирована по синусоидальному закону.

Согласно теории рассеяния электромагнитных волн на гофрированных структурах [12, 13] решётка имеет две собственные моды: мода E соответствует волне, в которой проекция вектора напряжённости электрического поля на плоскость решётки параллельна её гребням, и мода

гофры с различными профилями, можно получить коэффициенты рассеяния, лежащие в широких пределах ($0 \leq |R_\sigma| < 1$), как для моды E , так и для моды H . При отсутствии омических потерь на решётке выполняется равенство

$$|T_\sigma^2| + |R_\sigma^2| = 1. \quad (3)$$

Параболические зеркала предназначены для формирования поперечной структуры волновых пучков, циркулирующих внутри резонатора. Рабочая собственная мода — колоколообразный² волновой пучок — имеет почти плоский фазовый фронт вблизи гофрированного зеркала.

Формирование моды резонатора происходит следующим образом. Входной пучок разделяется решёткой на два пучка. При этом поле, соответствующее 0-му дифракционному порядку, осуществляет возбуждение резонатора, попадая на его первое зеркало, с него на второе, а со второго снова на решётку. Поле, отвечающее (-1)-му порядку, служит для вывода излучения из резонатора. Аналогично решётка делит падающее на неё из резонатора излучение на два пучка: первый, представляющий (-1)-й порядок дифракции, направляется на первое зеркало для формирования резонансного поля; второй, представляющий 0-й (зеркальный) порядок дифракции, выводит излучение из резонатора.

Для расчёта резонатора используем метод, описанный в работах [2, 15, 16]. Сформулируем интегральное уравнение для поля ψ_{-r} пучка волн, уходящего от решётки в направлении зеркала 1 (см. рис. 1). Оно связано с полем ψ_{+r} , падающим на решётку из резонатора (в направлении от зеркала 2) интегральным соотношением (индекс σ далее опускаем)

$$\psi_{+r} = G_{L/k} T_{2k/r} D_m R_{\text{ohm}} G_{L/k} T_{2k/r} D_m R_{\text{ohm}} G_{L/k} \psi_{-r}, \quad (4)$$

где $G_{L/k}$ — оператор, описывающий дифракцию при распространении волнового пучка от одного зеркала к другому, $T_{2k/r}$ — оператор фазовой коррекции, вносимой зеркалом [15], D_m — оператор диафрагмирования, который описывает изменение структуры пучка, падающего на зеркало, вследствие ограниченности последнего, R_{ohm} — оператор, учитывающий омический коэффициент отражения. Уравнение (4) написано для случая, когда равенства расстояния между зеркалами и дифракционной решёткой одинаковы и равны L .

Решётка предполагается неограниченной. Внешний входной пучок ψ_+ , падающий на резонатор, и внешний выходной пучок ψ_- , уходящий из резонатора, связаны дифракцией на решётке через матрицу рассеяния с пучком ψ_{+r} , падающим на решётку изнутри резонатора, и пучком ψ_{-r} , рассеянным решёткой внутрь резонатора, что может быть учтено соотношениями

$$\psi_- = R\psi_+ + T\psi_{+r}, \quad (5)$$

$$\psi_{-r} = T\psi_+ + R\psi_{+r}. \quad (6)$$

В соотношениях (5) и (6) необходимо учитывать, что коэффициенты R сильно зависят от частоты:

$$R \propto \exp(ikx \Delta\theta), \quad \Delta\theta \propto \Delta\omega, \quad (7)$$

где k — волновое число, $\Delta\theta$ — отстройка угла рассеяния от угла автоколлимации вследствие изменения $\Delta\omega$ частоты.

Для расчёта фазовой коррекции $\Delta\theta$ угла, входящей в выражение (7) и вносимой решёткой в рассеянный луч (-1)-го порядка, обратимся к лучевой структуре моды в резонаторе. Предположим, что гладкие зеркала одинаковы, причём резонатор симметричен относительно плоскости,

² С формой, близкой к гауссовой.

перпендикулярной плоскости решётки и направлению её рёбер. В плоскости резонатора, наклонённой под углом $\theta_{\text{гр}}$ к плоскости решётки, лучи образуют равнобедренный треугольник, стороны которого соединяют центры гладких зеркал и середину решётки, причём равные стороны имеют общую вершину на решётке. Обозначим угол между падающим на решётку и рассеянным ей лучами через φ . Рассмотрим проекции волновых векторов падающего и рассеянного лучей на плоскость симметрии резонатора. Они имеют величины

$$\kappa_{\perp} = k \cos(\varphi/2). \quad (8)$$

В плоскости симметрии введём углы между нормалью к плоскости решётки и проекциями падающего ($\theta_{\perp i}$) и рассеянного ($\theta_{\perp r}$) лучей. Эти проекции связаны вследствие рассеяния на решётке соотношением

$$\kappa_{\perp} \sin \theta_{\perp r} = \kappa_{\perp} \sin \theta_{\perp i} + m k_d, \quad (9)$$

где $k_d = 2\pi/D$ — модуль вектора решётки, D — её период, m — порядок дифракции (в нашем случае $m = -1$). Из соотношения (9) найдём изменение $\Delta\theta_{\perp r}$ угла при изменении частоты (волнового вектора) моды:

$$\Delta\theta_{\perp r} = -m \frac{k_d}{\kappa_{\perp}^2 \cos \theta_{\perp r}} \Delta\kappa_{\perp}, \quad (10)$$

где $\Delta\kappa_{\perp}$ — изменение величины κ_{\perp} . Для рабочей моды $\Delta\theta_{\perp r} = 0$.

Свяжем угол $\theta_{\text{гр}}$ с геометрическими параметрами: высотой h — расстоянием между центром гладкого зеркала и плоскостью решётки, длиной луча L — расстоянием между центром гладкого зеркала и центром решётки и углом падения луча на решётку θ :

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{h}{L}\right), \quad \theta_{\text{гр}} = \arcsin\left[\frac{h}{L \cos(\varphi/2)}\right], \quad \theta_{\perp r} = \frac{\pi}{2} - \theta_{\text{гр}}. \quad (11)$$

Учтём, что угол фазовой коррекции $\Delta\theta$ (угол между рассеянными лучами при изменении частоты, т. е. при изменении волнового числа k) меньше угла $\Delta\theta_{\perp r}$ в $\cos(\varphi/2)$ раз, или $\Delta\theta = \Delta\theta_{\perp r} \cos(\varphi/2)$, и получим выражение для угла фазовой коррекции

$$\Delta\theta = \frac{k_d}{k^2 \cos \theta_{\perp r}} \Delta k = \frac{k_d}{k^2 \sin \theta_{\text{гр}}} \Delta k. \quad (12)$$

Из равенств (4) и (6) следует интегральное уравнение для поля на решётке ψ_{-r} :

$$\psi_{-r} = T\psi_{+} + R G_{L/k} T_{2k/r} D_m R_{\text{ohm}} G_{L/k} T_{2k/r} D_m R_{\text{ohm}} G_{L/k} \psi_{-r}. \quad (13)$$

А из равенств (4) и (5) определяем искомую функцию ψ_{-} отражённого от резонатора пучка через найденную функцию ψ_{-r} и в итоге функцию входного пучка ψ_{+} :

$$\psi_{-} = R\psi_{+} + T G_{L/k} T_{2k/r} D_m R_{\text{ohm}} G_{L/k} T_{2k/r} D_m R_{\text{ohm}} G_{L/k} \psi_{-r}. \quad (14)$$

После решения интегрального уравнения (13) и нахождения поля ψ_{-} прошедшего пучка (14) вычисляем коэффициент прохождения

$$K(\omega) = \frac{\int |\psi_{-}|^2 ds}{\int |\psi_{+}|^2 ds}, \quad (15)$$

где интегрирование проводится по всему поперечному сечению падающего (ψ_{+}) и прошедшего (ψ_{-}) пучков.

Эти зависимости имеют вид обращённых резонансных кривых (см. рис. 2), причём при критической связи [4] коэффициент K в резонансной точке сколь угодно мало отличается от нуля. По ширине резонансной кривой определяется добротность резонатора Q и потери в нём δ , которые могут быть разделены на омические, потери на связь и дифракционные потери, обусловленные конечностью размеров зеркал резонатора. Наибольший интерес представляют потери на связь

$$Q = -\frac{3kL}{2\ln|R|}. \quad (16)$$

Из (16) следует, что добротность в резонаторе может быть снижена до величин $Q \approx 3kL$, которые могут быть ниже дифракционной минимальной добротности

$$Q_{\text{dif,min}} = 4\pi L_{\parallel}^2/\lambda^2, \quad (17)$$

где L_{\parallel} — протяжённость традиционного «гиротронного» резонатора, λ — длина волны. Такое понижение добротности позволяет при заданной мощности выходного излучения гиротрона понизить тепловую нагрузку на стенки резонатора.

Расчёт показал, что при указанных далее размерах зеркал резонатора в диапазоне частот $137,5 \text{ ГГц} < f < 142,5 \text{ ГГц}$ имеются три моды с частотами и добротностями, приведёнными в табл. 1. Добротность $Q_{\Delta\theta}$ рассчитана с учётом угла фазовой коррекции $\Delta\theta$ (в данном случае для мод соседних с центральной модой он составляет величину порядка 1°). Добротность Q_{corr} найдена для $\Delta\theta = 0$ в предположении возможности настройки углов резонатора на автоколлимацию на каждую конкретную моду, т. е. возможности его перестройки. Добротность Q_{corr} центральной моды и других мод определяется излучением из резонатора, возникающим вследствие рассеяния на решётке. Снижение добротности на соседних частотах в случае наличия угла фазовой коррекции $Q_{\Delta\theta}$ обусловлено излучением из резонатора, связанным с ограниченностью размеров зеркал.

2. МАКЕТ РЕЗОНАТОРА

В нашем распоряжении от предыдущей работы [17] оказалась дифракционная решётка с синусоидальным профилем гофрировки $H = A_0 \cos(2\pi x/D)$. Расчёт параметров решётки для работы в диапазоне 140 ГГц выполнен с помощью разработанного программного обеспечения [9], основанного на методике [13]. Характеристики рассеяния при соблюдении условий автоколлимации приведены на рис. 3 при угле падения входного пучка на решётку 45° . Направление гофра с плоскостью падения также составляло угол 45° . Дифрагированный пучок лежал в плоскости, перпендикулярной плоскости падения. Направление его распространения составляло угол 45° плоскостью гофрированной решётки. Расстояние между центрами зеркал и решёткой равнялось $L \approx 50 \text{ мм}$, так что центры зеркал и решётки образовывали равносторонний треугольник.

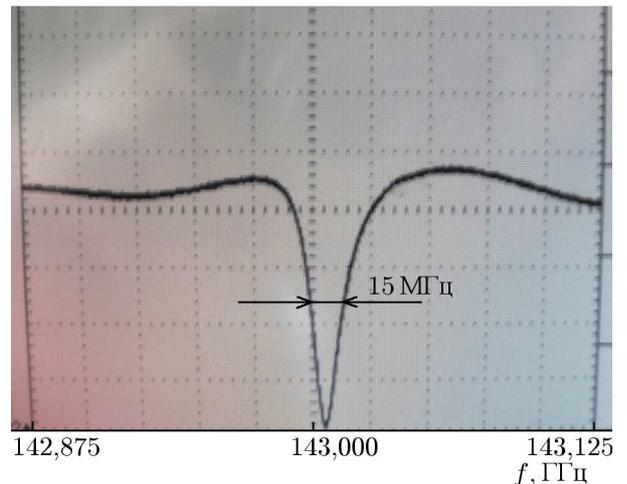


Рис. 2. Частотная характеристика трёхзеркального резонатора, используемого в качестве резонансного фильтра (изображение с осциллографа; вертикальная ось соответствует мощности). Резонанс на частоте 143 ГГц, добротность $Q \approx 10\,000$. Связь близка к критической

Таблица 1

$f, \text{ ГГц}$	138	140	142
$Q_{\Delta\theta}$	$7,4 \cdot 10^3$	$8,8 \cdot 10^3$	$6,2 \cdot 10^3$
Q_{corr}	$9,7 \cdot 10^3$	$8,8 \cdot 10^3$	$7,5 \cdot 10^3$

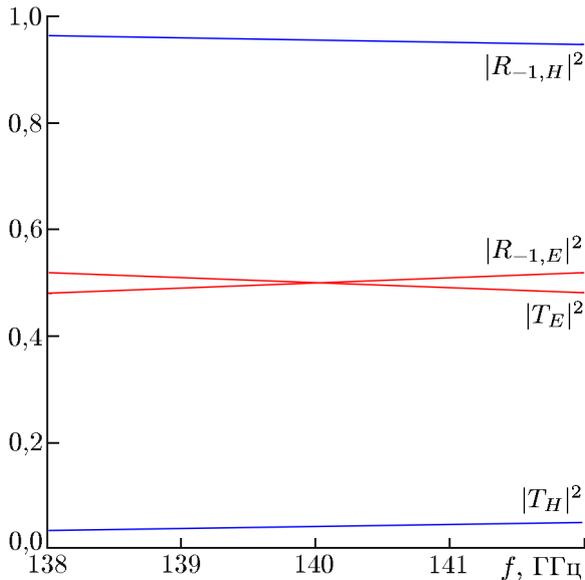


Рис. 3. Зависимости коэффициентов рассеяния $|R_{-1,\sigma}|^2$ и $|T_\sigma|^2$ ($\sigma = E, H$) для поляризаций E и H в интервале частот, захватывающем три продольных моды резонатора. Рабочая мода H с частотой 140,25 ГГц в центре

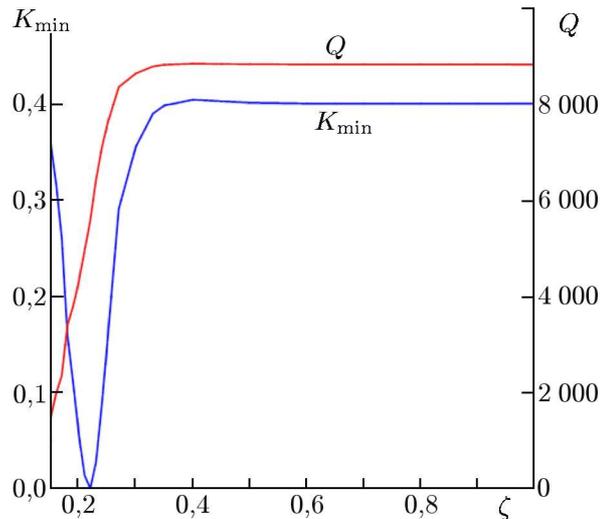


Рис. 4. Зависимости минимума коэффициента прохождения K_{\min} и добротности Q от размеров диафрагмированной решётки по отношению к эталонному размеру

Параметры решётки — период гофрировки $D = 2,14$ мм и её амплитуда $A_0 = 0,45$ мм — обеспечивают для моды H (см. рис. 3) соотношение коэффициентов рассеяния пучков по мощности $|T_H|^2/|R_{-1,H}|^2 \approx 1/20$. Это позволяет использовать 0-й пучок для возбуждения резонатора, а (-1) -й пучок в качестве выходного пучка.

Вне резонанса поступающее на вход излучение практически без ослабления передаётся на выход. В случае резонанса в резонаторе циркулирует поток излучения, мощность которого определяется добротностью и существенно превышает мощность ответвляемого потока. В случае критической связи поток мощности в резонаторе настолько возрастает, что обратно в тракт ответвляется излучение с мощностью, равной поступающей, и на выход фильтра на резонансной частоте ничего не проходит (см. рис. 4).

Для иллюстрации вышесказанного на рис. 4 изображены зависимости минимума коэффициента прохождения и добротности от размера ζ диафрагмированной решётки по отношению к эталонному. В качестве эталонного были выбраны размеры 75 мм по оси x и 53 мм по оси y . Диафрагмирование в этом случае выполняло роль изменения величины связи. Размеры диафрагмирования изменялись пропорционально. При $\zeta = 0,22$ наблюдается вышеописанное явление и резонатор при этих параметрах может быть использован в качестве нотч-фильтра.

Для работы резонатора необходимо, чтобы на решётке были обеспечены условия для интерференции входного и поступающего после отражения на зеркалах 1 и 2 пучков. Прежде всего, это относится к одинаковости структур проекций входного и поступающего из резонатора пучков.

При круглом сечении падающего пучка его сечение плоскостью решётки представляет собой эллипс, вытянутый в направлении распространения; для двух ортогональных направлений эллипсы развёрнуты и перекрываются не полностью. Чтобы избежать потерь, падающий пучок предварительно деформируется с тем, чтобы его сечение было кругом. Пучок, поступающий из резонатора, имеет такое же сечение. Расчёт структур пучков по мере распространения проводился по уравнению (4).

Параметры системы подбирались так, чтобы проекции пучков на плоскость решётки представляли собой круг с радиусом $a_g = 7,5$ мм, причём пучки в точках пересечения с плоскостью решётки были бы коллимированные. Размеры зеркал, их радиусы кривизны и расстояния между ними приведены в табл. 2. Ось x лежит в плоскости падения луча на зеркало, а ось y ей перпендикулярна.

Таблица 2

Зеркала	1, 2
Размер по оси x , мм	55,4
Размер по оси y , мм	31,0
Радиус кривизны по оси x , мм	1 147
Радиус кривизны по оси y , мм	190

3. ЭКСПЕРИМЕНТ С МАКЕТОМ РЕЗОНАТОРА НА 140 ГГц

Созданный лабораторный макет квазиоптического трёхзеркального резонатора с отражательной дифракционной решёткой, имеющей синусоидальный профиль гофра, предназначен для работы в полосе частот 130÷143 ГГц. Макет (см. рис. 5) включает в себя: источник излучения — лампу обратной волны; рупорно-зеркальный переход, обеспечивающий формирование поступающего излучения в виде волнового пучка требуемой конфигурации и поляризации; собственно резонатор; приёмный рупор с подключённым квадратичным детектором; малошумящий предусилитель и осциллограф в качестве регистратора.

С выхода лампы обратной волны излучение поступает по прямоугольному волноводу основного сечения $1,6 \times 0,8$ мм на формирователь, включающий в себя конический рупор (длина 150 мм, диаметр раскрыва 30 мм) и два зеркала 3 и 4, где оно преобразуется в гауссов пучок с требуемой геометрией и поляризацией. Для работы на моде H необходимая ориентация линейной поляризации устанавливается скруткой волновода основного сечения на $35,5^\circ$. Чтобы убрать различия в структуре «зеркального» и дифракционного пучков, падающему на решётку пучку придаётся сужение по вертикали, обеспечивающее круговой профиль сечения пучка плоскостью решётки (на рис. 5 показан штриховой линией).

Особенностью геометрии резонатора, образованного решёткой и зеркалами 1 и 2, является размещение зеркал. Они расположены так, что их центры находятся в вершинах равностороннего треугольника, плоскость которого составляет угол $54,5^\circ$ с плоскостью решётки. Это позволило поместить зеркала 1 и 2 на общей пластине, установленной под углом. Принимаемое в направлении (-1) -го порядка дифракции излучение поступало на квадратичный детектор, и сигнал, пропорциональный мощности, наблюдался на экране осциллографа.

Макет смонтирован на единой массивной текстолитовой плите. Гофрированное зеркало зафиксировано в отверстии в плите, что допускает его поворот относительно вертикальной оси при юстировке. Предварительная юстировка резонатора осуществлялась по оптическому излучению с использованием лазерной указки.

Применение свипуемой лампы обратной волны (типа ОВ-76) позволяет наблюдать частотную характеристику на экране осциллографа, а при необходимости измерений с повышенной точностью установки частоты — использовать систему фазовой автоподстройки частоты лампы обратной волны по эталонному генератору — синтезатору, имеющему стабильность до 10^{-6} .

Пример частотной характеристики резонатора вблизи одной из областей резонансного поглощения приведён на рис. 2. В диапазоне частот 127÷150 ГГц наблюдается восемь таких резонансов, отстоящих на 2 ГГц друг от друга. Такой межмодовый интервал соответствует длине пути в резонаторе (150 мм). Добротность резонатора составляет величину порядка 10^4 , от 12 000 в высокочастотной части интервала и до 7 000 в низкочастотной. Глубина режекции также зависит от частоты. На рабочей моде (143 ГГц) она максимальна (до 30 дБ), что свидетельствует о близости связи к критической. На соседних модах режекция заметно уменьшается, а ниже 130 ГГц не об-

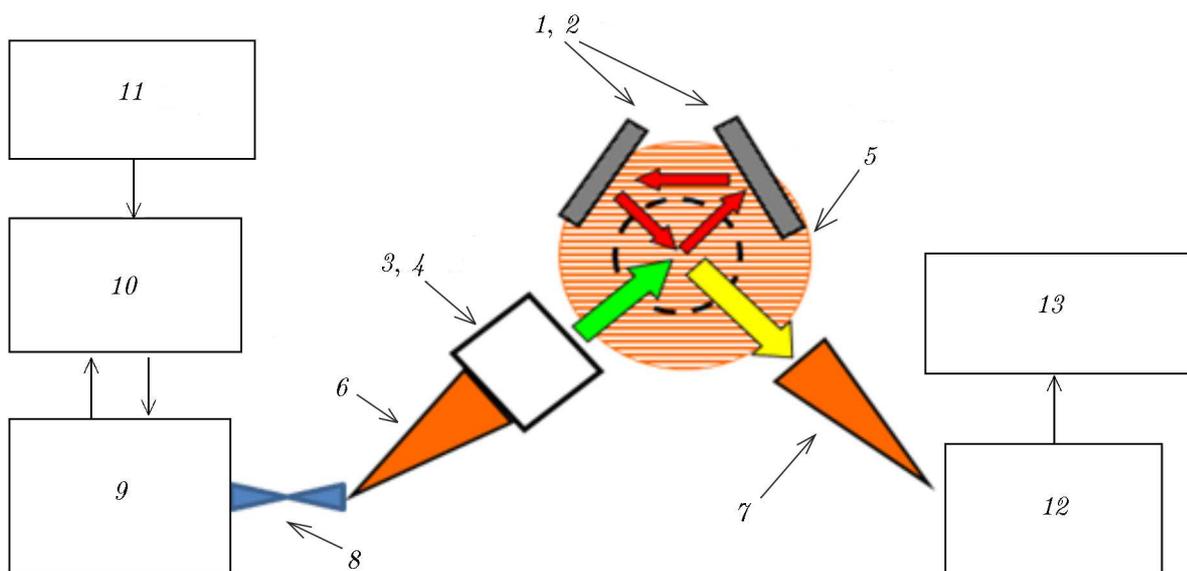


Рис. 5. Схема лабораторного макета трёхзеркального резонатора: 1, 2, 3 и 4 — зеркала, 5 — дифракционная решётка, 6 и 7 — рупоры, 8 — волноводная скрутка, 9 — лампа обратной волны ОВ-76, 10 — фазовая автоподстройка частоты, 11 — синтезатор частоты, 12 — детектор, 13 — осциллограф

наруживается. Отличие результатов от теоретических вызвано с недостаточно точной установкой зеркал. Следует отметить, что частота моды менялась при любой вариации расстояния между зеркалами.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена теория трёхзеркального эшелеттного резонатора бегущей волны с перестройкой частоты, одно из зеркал которого представляет собой дифракционную отражательную решётку. Для организации обратной связи (образования резонансной моды) используется (-1) -й максимум дифракции, поле которого имеет большую угловую дисперсию. Теория, построенная на интегральных уравнениях, описывающих как дифракцию в открытых резонаторах, так и рассеяние на отражательных дифракционных решётках, позволяет учесть дифракционные потери, связанные с конечным размером зеркал, потери, обусловленные существованием зеркального лепестка на решётке (потери на связь), и омические потери. Показана возможность существенного разрежения спектра собственных мод резонатора, имеющих структуру бегущих волн. Структура полей мод позволяет осуществить эффективный ввод и вывод излучения из резонатора. Эксперимент в диапазоне частот вблизи 140 ГГц подтвердил теоретические расчёты.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-02-00832-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайнштейн Л. А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. М.: Сов. Радио, 1966. 476 с.
2. Авербах В. С., Власов С. Н., Таланов В. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10, № 9–10. С. 1333.

3. Denisov G. G., Kusikov S. V., Shmelyov M. Yu. // Proc. 18th Int. Conf. on IR and MM Waves. Colchester, UK, Sept. 6–10, 1993. P. 353.
4. Kasparek W., Petelin M., Erckmann V., et al. // Fusion Engineer. Design. 2009. V. 84, No. 2–6. P. 1 002.
5. Власов С. Н., Копосова Е. В., Кошуринов Ю. И. и др. // ЖТФ. 2012. Т. 82, № 7. С. 92.
6. Власов С. Н., Копосова Е. В., Кошуринов Ю. И. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 6. С. 440.
7. <http://bse.sci-lib.com/article127496.html>.
8. Копосова Е. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 4. С. 269.
9. Копосова Е. В. // ЖТФ. 1995. Т. 65, № 2. С. 163.
10. Косарев Е. Л. // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. 3, № 7. С. 295.
11. Власов С. Н., Копосова Е. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 10. С. 733.
12. Шестопалов В. П., Кириленко А. А., Масалов С. А., Сиренко Ю. К. Резонансное рассеяние волн. Т. 1. Дифракционные решётки. Киев: Наукова думка, 1986. 232 с.
13. Petit R. Electromagnetic theory of gratings. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1980. 284 p.
14. Копосова Е. В., Каспарек В., Хенль Х. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 5. С. 351.
15. Таланов В. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1965. Т. 8, № 2. С. 260.
16. Власов С. Н., Копосова Е. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 4. С. 343.
17. Власов С. Н., Катин С. В., Копосова Е. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 2. С. 153.

Поступила в редакцию 17 февраля 2017 г.; принята в печать 26 февраля 2018 г.

QUASI-OPTICAL THREE-MIRROR ECHELETTE TRAVELING-WAVE CAVITY WITH FREQUENCY TUNING: DIFFRACTION THEORY AND EXPERIMENT

S. N. Vlasov, S. V. Katin, E. V. Kuposova, L. N. Lubyako, and L. I. Prokofyev

We develop the theory of a three-mirror echelette traveling-wave resonator cavity with frequency tuning, in which one of the mirrors is an echelette reflection grating. The theory makes it possible to allow for the diffraction losses connected with finite dimensions of the mirrors, the losses due to the existence of a mirror lobe at the grating (connection losses), and Ohmic losses. The possibility of significant rarefaction in the spectrum of the cavity eigenwaves is demonstrated. The structure of mode fields allows one to ensure efficient injection of the radiation into the cavity. An experiment performed in a frequency range near 140 GHz confirmed the theoretical calculations.