

## ***E*-ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ОТКРЫТОМ РЕЗОНАТОРЕ С ЭШЕЛЕТНЫМ ЗЕРКАЛОМ**

© О.И.Белоус, А.И.Фисун

Открытые резонаторы (ОР) с отражательными дифракционными решетками-эшелеттами, работающими в режиме автоколлимации, широко используются в высокостабильных по частоте твердотельных и электронно-вакуумных источниках миллиметрового диапазона, а также в оптических квантовых генераторах. Как правило, применяются решетки со сравнимым с длиной волны периодом структуры, для которых коэффициент отражения сильно зависит от поляризации излучения [1]. При *H*-поляризованном излучении (электрический вектор падающей волны перпендикулярен штрихам решетки) для идеально проводящих зеркал коэффициент отражения в режиме автоколлимации максимален и близок к 1 при выполнении следующего соотношения:

$$\frac{\lambda}{l} = \frac{2 \sin \varphi}{n},$$

где  $\lambda$  — длина волны,  $l$  — период решетки,  $n$  — номер гармоники отраженной волны. В частности, для прямоугольного эшелетта на первой гармонике при угле падения  $\varphi = 45^\circ$  соотношение длины волны и периода решетки  $\lambda/l = 1.414$ , что соответствует полуволновой высоте ступени. Именно это и вызывает дополнительное разрежение спектра по сравнению с обычным ОР с гладкими зеркалами [2].

Однако решение некоторых технических задач требует применения дисперсионных ОР с *E*-поляризованным излучением. При *E*-поляризованном излучении строгий геометрический резонанс не наблюдается. Из точного решения задачи дифракции волн на эшелетте [1] следует, что в области  $\lambda/l \approx 0.7$  существует автоколлимационное отражение *E*-поляризованного излучения. Но использование этого режима для создания ОР затруднено тем, что коэффициент отражения меньше 1, а также близким соседством точек скольжения.

В данной работе изложены результаты исследования возбуждения высокочастотных *E*-поляризованных колебаний в ОР со сложным эшелеттным зеркалом, которое образовано двумя эшелеттами с прямоугольными зубцами. Эшелетты установлены под углом блеска относительно оси

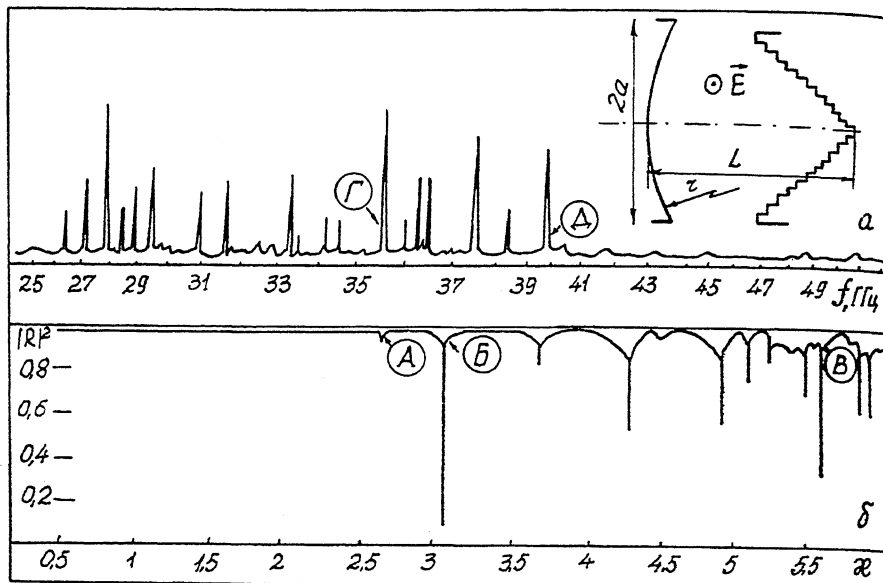


Рис. 1. Спектры  $E$ -поляризованных колебаний в сферуголковоэшелеттном ОР: а — экспериментальный; б — расчетный.

ОР и имеют общую освещенную грань при вершине угла. Такой резонатор назван нами сферуголковоэшелеттным ОР [3]. Известно, что при резонансной высоте ступени  $E$ -поляризованное излучение отражается в нулевую гармонику и эшелетты можно заменить зеркальной плоскостью [4]. Предполагалось, что второй эшелетт позволит организовать колебательный процесс в ОР при последовательном зеркальном отражении  $E$ -поляризованного излучения от двух эшелеттов. Однако детальное исследование спектров и топологии типов колебаний выявило более сложные, отличающиеся от очевидных механизмы возбуждения  $E$ -поляризованных колебаний в резонаторе с уголковоэшелеттным зеркалом.

В эксперименте использовался сферуголковоэшелеттный ОР со сферическим зеркалом с радиусом кривизны  $r = 140$  мм, апертурой  $2a = 120$  мм и двумя щелями связи сечением  $0.1 \times 7.2$  мм. Размеры уголковоэшелеттного зеркала —  $80 \times 100$  мм. Каждый эшелетт имеет по 12 зубцов и высоту ступени 4 мм, что соответствует резонансной частоте 37.5 ГГц на  $H$ -поляризации.

На рис. 1, а показаны конфигурация сферуголковоэшелеттного ОР и спектр возбуждения  $E$ -поляризованных колебаний в диапазоне частот 24.5–53 ГГц при длине резонатора  $L = 100$  мм, снятый с помощью панорамных изме-

рителей КСВН. Поляризация задавалась поворотом уголковоэшелеттного зеркала вокруг оси ОР на угол  $90^\circ$  относительно щелей связи сферического зеркала. В отличие от резонатора с одним эшелеттом, в котором при резонансной высоте ступени эшелетта [2] возникают только *H*-поляризованные колебания, в сфероуголковоэшелеттном ОР спектр *E*-поляризованных колебаний более густ, что свидетельствует в пользу существования нескольких механизмов возбуждения колебаний. На возможность возбуждения в сфероуголковоэшелеттном ОР *E*-поляризованных типов колебаний кроме *H*-поляризованных было указано нами ранее [4].

В теоретическом исследовании механизма возбуждения *E*-поляризованных типов колебаний в сфероуголковоэшелеттном ОР использована двумерная волноводная модель резонатора [5], дополненная *S*-матриц *E*-тройника, через который запитывающий волновод соединен с резонатором, а также набором ступеней в волноводе, которыми представлены эшелеттные зеркала. Рассеяние волн на ступенях в волноводе описывается соответствующими матрицами рассеяния.

На рис. 1, б показан расчетный спектр *E*-поляризованных колебаний уголковоэшелеттного двумерного ОР при возбуждении со стороны плоского зеркала, выраженный как квадрат модуля коэффициента отражения плоской волны  $|R|^2$  от запитывающего резонатор *E*-тройника. Спектр возбуждения со стороны эшелеттного зеркала принципиально не отличается от приведенного здесь спектра, и механизмы возбуждения колебаний во многом также тождественны. Поэтому для краткости мы приводим результаты исследований только для случая возбуждения со стороны плоского зеркала. Независимым параметром является безразмерная частота  $\kappa = L/\lambda$ , где  $L$  — длина резонатора. Исследования проведены в интервале  $0 \leq \kappa \leq 5.5$  при длине резонатора, связанной с высотой ступени соотношением  $L = 5h$ . Отметим, что для *H*-поляризованной волны резонансными являются значения  $\kappa = 2.5$  и  $5$  (при этом наблюдается резонанс второго рода [1]). Однако для обоих случаев возбуждения *E*-поляризованных колебаний при указанных значениях  $\kappa$  колебания не возбуждаются, что наблюдается и при экспериментальном исследовании.

На рис. 2, а-в показана топология наиболее характерных типов колебаний. Изображены линии равных амплитуд *E*-компоненты электромагнитного поля. Общим для большинства типов колебаний является различие в распределении поля вблизи уголковоэшелеттного зеркала и в открытой части резонатора. Для малых значений  $\kappa$  (например, при  $\kappa = 2.68$ ) поле внутри резонатора можно представить как

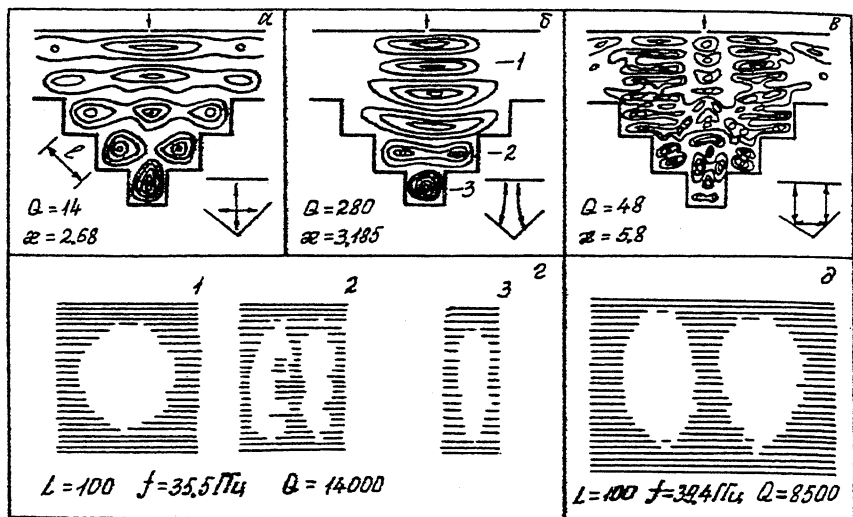


Рис. 2. Топологии полей: а, б, в — расчетные (соответствующие им частоты обозначены индексами А, Б, В на рис. 1, б), г, д — полученные методом визуализации с помощью пробного тела (соответствующие им частоты обозначены индексами Г, Д на рис. 1, а).

суперпозицию волнового потока, идущего вдоль оси (максимальный поток) и отраженного от ступеней эшелетта в поперечном направлении (см. рис. 2, а, механизм формирования типов колебаний условно показан внизу слева). Добротность такого типа колебаний мала по нескольким причинам: в силу относительно малого объема резонатора в длинноволновом приближении больших дифракционных потерь, вызванных большими амплитудами полей на краях зеркал.

При больших значениях  $\kappa$  (например,  $\kappa = 5.8$ ) формируется тип колебаний, вызванный последовательным отражением волны от двух эшелеттов в нулевую гармонику (см. рис. 2). Существование такого типа колебаний ожидалось в силу очевидности и подтверждено экспериментально. На рис. 2, д показана его топология, полученная методом пробного тела [6]. Установка для визуализации полей была модернизирована для того, чтобы можно было снимать распределение поля в пространстве между зеркалами, а также вблизи эшелеттного зеркала, где трансформация поля особенно ощутима. Рис. 2, д показывает распределение поля в плоскости, перпендикулярной оси резонатора, а направление сканирования пробного тела по строкам — перпендикулярно штрихам эшелетта. В уголковоэшелеттной части ОР поле претерпевает изменение. В данном случае резонатор можно представить состоящим из трех элементов:

плоского зеркала (или сферического в эксперименте) и двух независимых эшелеттов, так как в области вершины уголковоэшелеттного зеркала поле практически равно нулю. Размещение поглотителя на общей освещенной грани зеркала не вносило изменений в структуру поля и не влияло на добротность ОР на данном типе колебаний.

Наибольший интерес представляют высокодобротные типы колебаний, возбуждающиеся при  $\kappa = 3.1898$  и  $\kappa = 5.6034$  (при возбуждении со стороны эшелеттного зеркала  $\kappa = 3.1832$  и  $\kappa = 5.6112$  соответственно). Из определения безразмерной частоты  $\kappa$  и выбранных геометрических размеров резонатора видно, что этот тип колебаний возбуждается при  $h \approx 0.63\lambda$ , что соответствует соотношению длины волны и периода решетки  $\lambda/l \approx 0.89$ . При этом для  $E$ -поляризованной волны наблюдается автоколлимационное отражение на  $-1$  гармонике с интенсивностью  $W_{-1} \approx 0.9$ <sup>[1]</sup>, а ближайшая точка скольжения находится относительно далеко — в области  $\lambda/l \approx 0.65$ . Вторым фактором, влияющим на добротность и устойчивость этого типа колебаний, является переотражение волноводных волн на ступенях эшелеттов. При этом волны, идущие к периферийной области ОР, практически полностью отражаются в обратном направлении и только незначительная часть энергии дифрагирует на краях зеркал. Переотражение на ступенях вызывает возмущение структуры поля вблизи уголковоэшелеттного зеркала и концентрацию поля вблизи оси ОР, что хорошо видно на рис. 2, б, где в открытой части ОР структура поля близка к основному типу, а в уголковоэшелеттной части наблюдается ее деформация.

Расчетная добротность колебаний, сформированных при дополнительной фокусировке энергии уголковоэшелеттным зеркалом, на порядок превышает добротность других типов и для типа колебаний с продольным числом  $q = 6$  ( $\kappa = 3.1932$ ) достигает значения  $Q = 280$ . Экспериментально этот тип колебаний наблюдался на частоте  $f = 35.5$  ГГц. На рис. 2, г показано распределение поля, снятое в плоскостях, перпендикулярных оси ОР в разных частях резонатора. Цифрами 1-3 отмечено их соответствие расчетной топологии поля при  $\kappa = 3.185$  (рис. 2, б). Поле данного типа колебаний стянуто к оси резонатора, и размещение поглотителя на периферии сферического зеркала практически не снижает его добротности. Таким образом, кроме дисперсионных свойств, уголковоэшелеттное зеркало обладает дополнительным фокусирующим свойством, обусловленным резонансными свойствами этого зеркала в поперечном направлении и вызываемым ступенчатой структурой этого зеркала. Детально механизм формирования  $H$ -поляризованных высокодобротных колебаний исследовался нами ранее. Переотражение волноводных волн в этом механизме также

является определяющим. В целом наблюдаемые экспериментально и рассчитанные теоретическим путем типы колебаний, которые условно можно отнести к основным из-за их высокой добротности и концентрации поля вблизи оси ОР, сопровождаются возбуждением тпов колебаний с более сложной структурой, но значительно меньшей добротностью, которые здесь не рассматривались.

Отметим, что некоторое расхождение расчетных и экспериментальных данных вызвано следующим: в расчетной модели использовано плоское, а не сферическое зеркало; расчет проводился при относительно низких значениях  $n$ , в то время как в эксперименте использовался резонатор с продольным числом  $q = 20-25$ .

Таким образом, в ОР с дисперсионным зеркалом сложной формы, каким является уголковоэшелеттное зеркало, возбуждаются  $E$ -поляризованные колебания с высокой добротностью. Основными механизмами в формировании высокодобротных  $E$ -поляризованных колебаний являются автоколлимационное отражение энергии и трансформация волноводных волн на ступенях, что, как и в случае  $H$ -поляризованных колебаний, приводит к концентрации поля в центральной части резонатора и уменьшению дифракционных потерь вследствие малой интенсивности поля на краях зеркал. Это свойство может быть использовано для создания высокодобротных малогабаритных ОР с дополнительным разрежением спектра.

### Список литературы

- [1] Шестопалов В.П., Кириленко А.А., Масалов С.А., Сиренко Ю.К. Резонансное рассеяние волн. Т. 1. Дифракционные решетки. Киев, 1986. 232 с.
- [2] Косарев Е.Л. // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. 3. В. 7. С. 295-298.
- [3] Архипов А.В., Белоус О.И., Булгаков В.М., Фисун А.И., Фурсов А.М. // ПТЭ. 1991. № 3. С. 106-109.
- [4] Belous O.I., Fisun A.I., Fursov A.M. // Proc. 17th Int. Conf. of IR and MM Waves. Pasadena, California, USA, 1992. P. 456-457.
- [5] Белоус О.И., Кириленко А.А., Ткаченко В.И., Фисун А.И., Фурсов А.М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. № 3. С. 300-314.
- [6] Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Методы и техника / Под ред. В.А. Валитова. М.: Радио и связь, 1984. 295 с.

Поступило в Редакцию  
26 сентября 1995 г.