

УДК 621 372.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКРЫТЫХ РЕЗОНАТОРОВ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ НА ЗЕРКАЛЕ

*Б. М. Булгаков, В. Н. Скрасанов, А. И. Фисун*

Проведено исследование полусимметричного открытого резонатора с протяженными прямоугольными неоднородностями на плоском зеркале в виде канавки, выступа и ступеньки с поперечными размерами, сравнимыми с длиной волны, и продольными размерами, выходящими за пределы пятна поля на зеркале. Получено хорошее соответствие измеренной зависимости добротности от размеров канавки на плоском зеркале с рассчитанной на основе решения задачи дифракции  $H$ -поляризованной волны на плоскости с такой же канавкой. Экспериментально обнаружено, что неоднородности в канавке возбуждают распространяющуюся вдоль нее электромагнитную волну. Исследовано влияние этой волны на потери в резонаторе.

Новая область применения открытых резонаторов (ОР) — колебательные системы полупроводниковых генераторов [1-4] и преобразователей частоты миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов — стимулирует дальнейшие исследования ОР с неоднородностями, которыми являются как сами полупроводниковые диоды, заключенные в предохранительный корпус, так и разнообразные конструктивные элементы, размещаемые внутри ОР для согласования импедансов диода и резонатора, отвода тепла и др. При этом форма и размеры вносимых в ОР неоднородностей должны обеспечить сохранение высокой добротности резонатора и структуры поля в нем. Рассматриваемые в данной работе неоднородные ОР удовлетворяют перечисленным требованиям.

Работа посвящена исследованию открытого резонатора, образованного двумя зеркалами (рис. 1), из которых одно является сферическим с щелевым выводом энергии, а второе зеркало — плоское, и в нем выполнена прямоугольная канавка глубиной  $h$ , шириной  $b$  и длиной  $l$ . Сферическое зеркало имеет радиус кривизны  $R=150$  мм и апертуру  $2a=85$  мм. Плоское зеркало сконструировано таким образом, что путем взаимного перемещения его составных частей можно изменять в широких пределах размеры канавки, а также получать конфигурации зеркала, поперечные сечения которых показаны цифрами I, II, III на рис. 1. Измерения выполнены в 8-миллиметровом диапазоне радиоволн. Нагруженная добротность измерялась по полуширине резонансной кривой, наблюдаемой на экране спектра-анализатора, при частотной

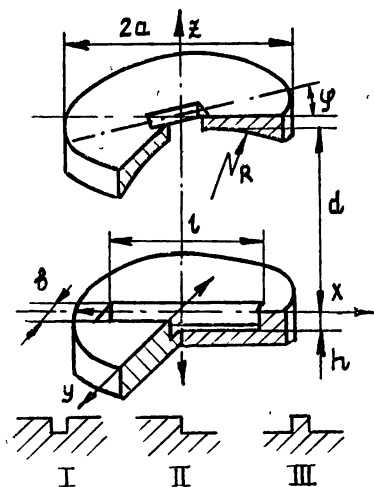


Рис. 1.

в широких пределах размеры канавки, а также получать конфигурации зеркала, поперечные сечения которых показаны цифрами I, II, III на рис. 1. Измерения выполнены в 8-миллиметровом диапазоне радиоволн. Нагруженная добротность измерялась по полуширине резонансной кривой, наблюдаемой на экране спектра-анализатора, при частотной

модуляции клистрона пилообразным напряжением. Распределение поля в ОР регистрировалось на двухкоординатном самописце по изменению амплитуды отраженной волны при введении в объем резонатора малого возмущающего тела.

## 1. ОТКРЫТЫЙ РЕЗОНАТОР С НЕОГРАНИЧЕННОЙ ПО ДЛИНЕ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ КАНАВКОЙ

Спектр тщательно изготовленного ОР с круглыми зеркалами при сосредоточенном возбуждении по оси резонатора состоит из вырожденных аксиально-симметричных типов колебаний цилиндрической геометрии  $TEM'_{lpq}$  с кратностью вырождения, равной  $\kappa = l + 2p + 1$ . Путем увеличения дифракционных потерь для отдельных типов волн или создания для них различных фазовых сдвигов можно снять указанное вырождение, которое мы будем называть структурным, получая те или иные  $TEM_{mnq}$ -типы колебаний прямоугольной геометрии [5]. Наряду со структурным существует также поляризационное вырождение типов колебаний ОР. В работе [6], например, наблюдалось расщепление высших типов колебаний, обусловленное деполяризующим действием устройства связи. Рассмотрим полусимметричный ОР с круглыми зеркалами и с длиной ( $l = 2a$ ) узкой ( $b = 0,18\lambda_0$ , где  $\lambda_0$  — рабочая длина волны) прямоугольной канавкой, прорезанной по диаметру плоского

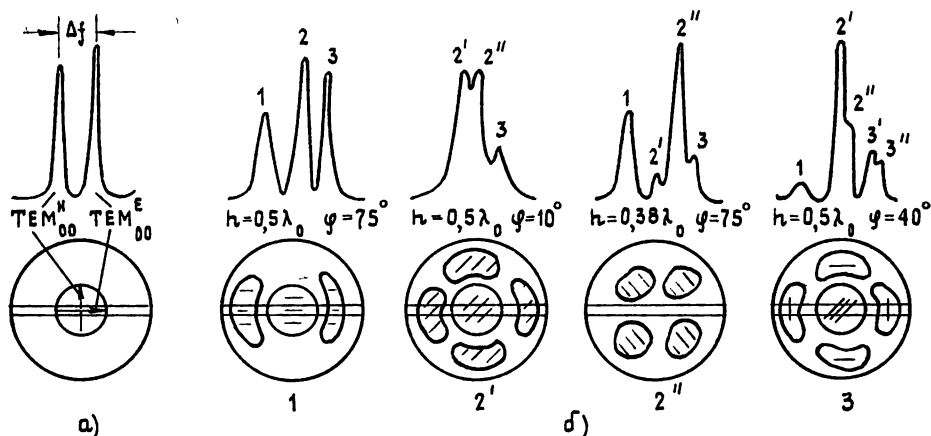


Рис. 2.

зеркала (см. рис. 1, профиль I). В верхней части рис. 2а представлена осциллограмма резонансной кривой ОР, возбужденного на  $TEM_{00q}$ -типе колебаний, для случая, когда щель связи расположена под углом  $\varphi = 45^\circ$  к образующей канавки, а  $h = \lambda_0/2$ . Наблюдаем две полностью разрешенные резонансные кривые, сдвинутые по частоте друг относительно друга на величину  $\Delta f$ . Исследование поля ОР дипольным пробным телом показало, что обеим резонансным кривым соответствует возбуждение резонатора на типах колебаний с одинаковым гауссовым распределением полей, но с взаимно ортогональной поляризацией поля в резонаторе. Таким образом, происходит снятие поляризационного вырождения для основного  $TEM_{00q}$ -типа колебаний ОР, расщепляющегося на два  $TEM_{00q}^H$  и  $TEM_{00q}^E$ , у которых соответственно вектор магнитной составляющей  $H$  или электрической составляющей  $E$  электромагнитного поля параллелен образующей канавки (оси  $Ox$ ). Нормированные квадраты амплитуд резонансных кривых для  $TEM_{00q}^H$  - и

ТЕМ $_{00q}^E$ -типов колебаний с высокой точностью аппроксимируются соответственно функциями  $\cos^4\varphi$  и  $\sin^4\varphi$ .

Снятие вырождения для высших типов колебаний показано на примере возмущения канавкой первого радиального типа колебаний ТЕМ $_{01q}^E$ . На рис. 26, сверху, изображены осциллограммы резонансных кривых и конфигурации пятен полей с указанием направления поляризации поля ОР относительно ориентации канавки на зеркале, причем номера конфигураций пятен полей соответствуют номерам резонансных кривых на осциллограммах. От размеров и ориентации канавки зависит форма резонансной кривой ОР, представляющая собой ряд частично или полностью разрешенных парциальных резонансных кривых. Феноменологически каждой из этих резонансных кривых соответствует свой парциальный колебательный контур, собственные частота и потери которого, а также коэффициенты связи с другими парциальными контурами и с нагрузкой, зависят от параметров канавки. Анализ структуры и поляризации поля ОР показывает, что такими парциальными колебательными контурами является ОР с канавкой на зеркале, возбуждаемый на различных типах колебаний прямоугольной геометрии ТЕМ $_{mn}$  с  $E$ - и  $H$ -поляризациями. Другими словами, наблюдается поляризационно-структурное расщепление исходного ТЕМ $_{lp}^E$ -типа колебаний цилиндрической геометрии. Кратность поляризационно-структурного вырождения  $\kappa = 2(2p + l + 1) = 2(m + n + 1)$  для первого радиального типа колебаний ( $p = 1, l = 0$ ) равна  $\kappa = 6$ , т. е. в рассматриваемом случае ОР может возбуждаться на ТЕМ $_{20q}^E$ , ТЕМ $_{02q}^E$  и ТЕМ $_{11q}^E$ -типах колебаний, причем на каждом либо с  $E$ -, либо с  $H$ -поляризацией. Оказывается, что собственные частоты и потери резонатора для каждого из этих типов колебаний различным образом зависят от параметров канавки. Например, полностью разрешенная парциальная резонансная кривая  $l$  соответствует возбуждению ОР на ТЕМ $_{20q}^E$ -типе колебаний с неизменными резонансной частотой и потерями, собственная частота ТЕМ $_{30q}^H$ -типа колебаний, соответствующего частично разрешенной парциальной резонансной кривой  $3''$ , оказывается близкой к собственным частотам ТЕМ $_{02q}^E$ - и ТЕМ $_{11q}^E$ -типов колебаний и зависит от глубины канавки.

Все последующие результаты данной статьи относятся к исследованию возмущения основного ТЕМ $_{00q}$ -типа колебаний ОР. Собственная частота ТЕМ $_{00q}^E$ -типа колебаний в случае узкой ( $b \leq 0,2\lambda_0$ ) канавки не зависит от ее глубины и равна собственной частоте невозмущенного ОР. На рис. 3 штриховой линией показана разность  $\Delta f$  между собственными частотами ТЕМ $_{00q}^H$ -и ТЕМ $_{00q}^E$ -типов колебаний, откуда следует, что собственная частота ТЕМ $_{00q}^H$ -типа зависит от глубины  $h$  канавки. Аналогично: нагруженная добротность ОР для ТЕМ $_{00q}^E$ -типа колебаний (обозначено ромбиками на рис. 3) постоянна, а для ТЕМ $_{00q}^H$  (обозначено кружками) — сильно зависит от  $h$ . Качественная трактовка этих результатов становится очевидной, если рассматривать канавку как плоскопараллельный волновод высотой  $b$ , подключенный открытым концом к зеркалу и закороченный с противоположной стороны. При  $b < \lambda_0/2$  волна с  $E$ -поляризацией не может распространяться в таком волноводе, а  $H$ -поляризованная волна проникает в канавку, отражается от короткозамкнутого конца и приобретает дополнительный фазовый набег  $\Delta\Phi = 2kh$  относительно волны, отраженной от поверхности зеркала ( $k = 2\pi/\lambda_0$  — волновое число). При  $\Delta\Phi = 2\pi n, n = 1, 2, \dots$ , т. е. когда глубина канавки кратна половине длины волны в свободном пространстве, рассеяние волны на зеркале с канавкой не происходит. Если же глубина канавки не оптимальна,  $h \neq n\lambda_0/2$ , то возникают дополнитель-

ные дифракционные потери, которые можно обнаружить с помощью внешней рупорной антенны. Результаты измерений интенсивности  $U_p$  волны, рассеянной зеркалом с канавкой под некоторым углом к оси ОР, представлены на рис. 3 штрихпунктирной линией. Помимо дополнительных дифракционных потерь, канавка вносит также дополнительные омические потери в боковых стенках и особенно в местах контактов подвижных соединений. Как показывает эксперимент, максимально достижимая добротность зависит от совершенства этих контактов. При тщательном выполнении дроссельных соединений общие потери ОР с канавкой для  $TEM_{00q}$ -типа колебаний превышают потери резонатора с гладкими зеркалами не более чем на 5%.

Снижение добротности резонатора, обусловленное дифракцией волны, распространяющейся между зеркалами, можно рассчитать, зная величину сечения рассеяния  $\tau$  этой волны на неоднородном зеркале.

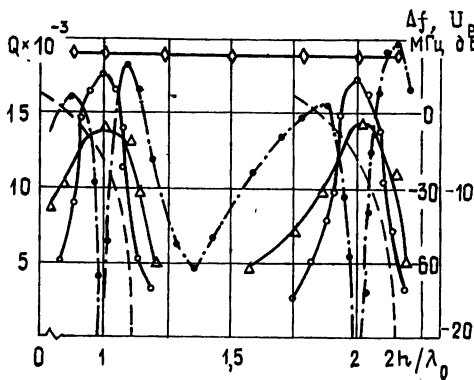


Рис. 3.

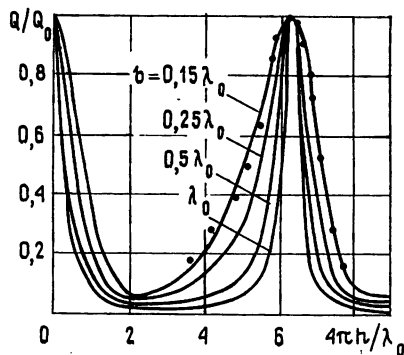


Рис. 4.

Относительное уменьшение запасенной в ОР энергии  $W_0$  за счет рассеяния за время  $t=2dc^{-1}$  прохода волной удвоенного расстояния между зеркалами равно

$$\delta_{\text{рас}} = P_0 \tau 2dc^{-1} / W_0 \equiv K\tau, \quad (1)$$

где  $P_0$  — мощность волны, падающей на единицу поверхности зеркала. Коэффициент  $K$  зависит только от геометрических размеров невозмущенного резонатора. Добротность ОР равна

$$Q = 2\pi d \lambda_0^{-1} / (\delta_0 + \delta_{\text{рас}}), \quad (2)$$

где  $\delta_0$  — учитывает все другие механизмы потерь в резонаторе, в том числе дополнительные омические потери на неоднородности. Если  $Q_0$  — добротность резонатора при  $\delta_{\text{рас}} = 0$ , то из (1) и (2) получим

$$Q/Q_0 = [1 + (K/\delta_0)\tau]^{-1}. \quad (3)$$

Коэффициент  $K/\delta_0$  определяется экспериментально. Для длинной канавки на плоском зеркале сечение рассеяния зависит от ее глубины и ширины  $\tau = \tau(h, b)$ . Расчет проведен на основании строгого решения задачи дифракции плоской  $H$ -поляризованной волны на прямоугольной канавке в бесконечном металлическом экране, аналогично решению задачи дифракции на щели в экране [7]. Сечение рассеяния, нормированное на мощность, падающую на единицу площади экрана, рассчитывалось по формуле  $\tau = 0,5\pi \int_{-1}^1 \sqrt{1 - \xi^2} |X(\xi)|^2 d\xi$ , где  $X(\xi)$  — трансформанта Фурье плоской волны, рассеянной канавкой. Подстановкой ре-

зультата расчета  $\tau$  в (3) получены зависимости, представленные на рис. 4. Коэффициент  $K/\delta_0$  вычислен для  $2kh_1=5,84$  и  $b_1=0,15\lambda_0$  из измеренного  $Q_1/Q_0=0,85$  и рассчитанного  $\tau(h_1, b_1)=0,0084723$  и равен 17,7. Хорошее соответствие рассчитанной кривой при  $b=0,15\lambda_0$  и экспериментальных данных означает, что дополнительные дифракционные потери ОР с качавкой на плоском зеркале обусловлены рассеянием поля резонатора на этой неоднородности и могут быть рассчитаны для модели ОР с бесконечной канавкой в бесконечном металлическом экране.

Как следует из рис. 4, зависимости  $Q(h)$  имеют резонансный характер, ширина резонанса увеличивается с уменьшением ширины канавки, максимальные же значения добротности ОР не изменяются. Из формулы (3) следует, что расширение резонансных кривых должно также происходить с ростом любых начальных потерь  $\delta_0$ . Такой вывод действительно подтверждается рис. 3, где треугольниками представлена зависимость добротности ОР на ТЕМ<sub>00q</sub><sup>H</sup>-типе колебаний для случая увеличения начальных потерь вблизи конфокальной геометрии резонатора. Экспериментальные исследования подтверждают, что добротность резонатора снижается с увеличением ширины канавки, и крутизна этой зависимости тем больше, чем сильнее отклонение глубины канавки от ее оптимальных значений. Однако на фоне монотонных изменений добротности  $Q(b)$  наблюдаются отдельные резкие спады при некоторых значениях ширины  $b$ . Последнее связано с тем, что при  $b \geq \lambda_0/2$  в плоскопараллельном волноводе возможно распространение продольных электрических  $E_n$  и магнитных  $H_n$  волноводных типов волн с критической длиной волны  $\lambda_{кр}=2b/n$ . Проводя перестройку ширины канавки, можно получить четвертьволновый резонатор в плоскопараллельном волноводе для того или иного типа волны, что приведет к резонансному накоплению энергии в канавке и переизлучению ее в свободное пространство. При этом условия  $h=\lambda_b/\lambda$ ,  $3\lambda_b/4, \dots$  и  $\lambda_b' = -\lambda_0/\sqrt{1 - (\lambda_0/\lambda_{кр})^2}$  определяют местоположения соответствующих четвертьволновых резонансных провалов.

## 2. ОТКРЫТЫЙ РЕЗОНАТОР С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ КАНАВКЕ

С точки зрения практического применения исследуемого ОР важно изучить влияние локальных неоднородностей, размещаемых в канавке, на свойства резонатора. Такие неоднородности приводят, прежде всего к увеличению собственных потерь ОР из-за возбуждения в канавке затухающей волны. На рис. 5 показана запись коэффициента отражения от ОР для ТЕМ<sub>00q</sub><sup>H</sup>-типа колебаний при движении изотропного зонда диаметром  $0,15\lambda_0$  вдоль канавки с размерами  $b=0,15\lambda_0$ ,  $h=0,5\lambda_0$ , когда часть канавки полностью заполнена прямоугольной металлической вставкой. Заполненная часть канавки показана на рисунке двойными линиями. Видно, что грань вставки возбуждает распространяющуюся вдоль канавки электромагнитную волну, интерферирующую с полем резонатора. Назовем эту волну квазисобственной волной канавки (КВК). Проведенные исследования показали, что КВК является радиационно затухающей волной волноводного типа, распределенной как внутри, так и вне канавки в плоскости, поперечной распространению, на площади порядка  $\lambda^2$ . Фазовая постоянная  $\beta_k=2\pi/\lambda_k$  и декремент затухания КВК зависят от поперечных размеров канавки.

Возбуждение КВК приводит к сложной зависимости потерь ОР от длины  $l$  ограниченной прямоугольной канавки на зеркале. Так, для симметрично расположенной относительно центра зеркала канавки глубиной  $h=0,5\lambda_0$  и  $h=\lambda_0$  зависимости добротности ОР как функции  $l$

имеют вид чередующихся максимумов и минимумов. Минимальные добротности наблюдаются строго при  $l=0,5\lambda_K$ ,  $1,5\lambda_K$  и  $2,5\lambda_K$ , т. е. при длинах канавки, равных нечетному числу полуволн КВК, а максимальные добротности достигаются для  $l$ , приблизительно кратных целому числу длин волн. Провалы добротности, естественно, трактуются как резонансное возбуждение канавки на квазисобственной волне, с последующим излучением энергии в свободное пространство. При  $l \approx n\lambda_K$  канавка не возбуждается, поскольку в этом случае распределение волны вдоль канавки антисимметрично, а возбуждает ее волна резонатора, симметричная относительно центра зеркала.

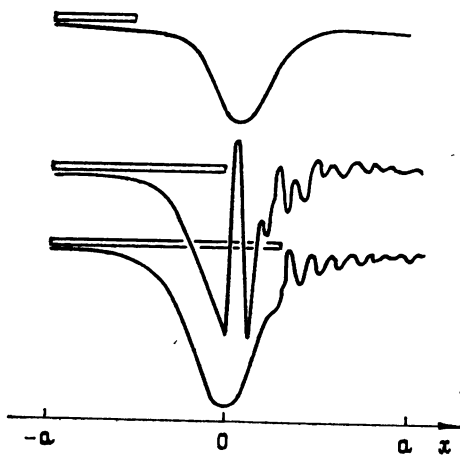


Рис. 5.

Рассмотрим квазиоптический детектор, образуемый при включении СВЧ диода между боковыми стенками канавки. На рис. 6 приведены результаты измерения выпрямленного напряжения  $U_d$  на выходе диода с барьером Шоттки. По оси абсцисс отложены положения граней прямоугольных вставок, полностью заполняющих часть канавки. На левой половине графика построены значения  $U_d$  как функции положения вставки слева от диода, при этом справа от него вставки нет. На правой половине графика отложено семейство кривых  $U_d$  как функции положения вставки справа от диода, при этом левая вставка находилась

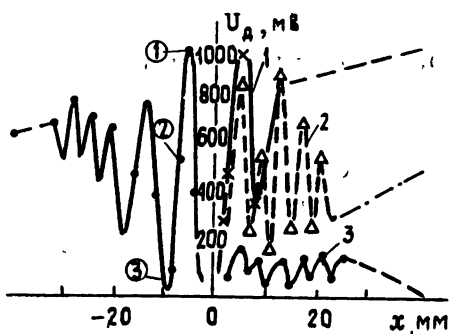


Рис. 6

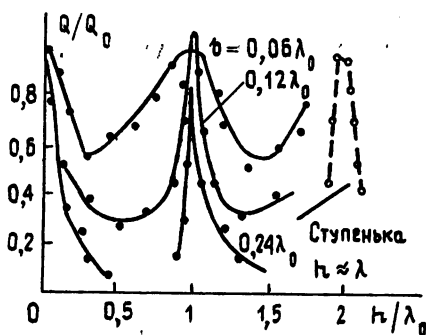


Рис. 7.

в показанных на рисунке цифрами 1, 2 и 3 положениях. Значение  $U_d$  при  $x=-40$  мм соответствует детектору с длинной канавкой. Регулируя длину  $l$  ограниченной канавки, можно как увеличить, так и уменьшить сигнал детектора. Изменение чувствительности детектора обусловлено изменением напряженности СВЧ поля на диоде при интерференции поля ОР с квазисобственной волной канавки и взаимной интерференцией КВК, возбуждаемых несколькими неоднородностями. Эта интерференция приводит к усилению или ослаблению преобразования запасенной в ОР энергии в энергию КВК и, как следствие, уменьшению или увеличению собственных потерь резонатора.

### 3. ОТКРЫТЫЙ РЕЗОНАТОР С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ СТУПЕНЬКОЙ И ВЫСТУПОМ

Другими разновидностями резонаторов, пригодными для размещения в них локальных и распределенных функциональных элементов, являются ОР с прямоугольной ступенькой (см. рис. 1, профиль II) и ОР с прямоугольным выступом (см. рис. 1, профиль III) на плоском зеркале. Продольный размер обеих неоднородностей выходит за пределы пятна поля на зеркале. На рис. 7 приведены экспериментальные зависимости добротности для  $TEM_{00q}^H$ -типа колебаний резонатора как функции высоты  $h$  прямоугольного выступа (точки) и прямоугольной ступеньки (кружки), выполненных по диаметру плоского зеркала,  $Q_0$  — добротность такого же резонатора, но с гладким плоским зеркалом. Если высота рассматриваемых неоднородностей кратна половине длины волны в свободном пространстве, то с точностью в 10% потери резонатора не изменяются. При увеличении ширины  $b$  выступа увеличивается перепад между максимальной и минимальной добротностью и форма кривой  $Q(h)$  становится все более симметричной. Прямоугольная ступенька и выступ для  $E$ -поляризованных колебаний являются сильно возмущающими, так что резонатор на  $TEM_{mnp}^E$ -типах колебаний не возбуждается. Взаимный разворот зеркал вокруг оси резонатора приводит к изменению мощности, отраженной от резонатора на собственной частоте по закону  $\cos^4\varphi$ .

Проведенные исследования показали, что внесение в открытый резонатор неоднородностей, имеющих резонансные размеры, позволяет сохранить высокую добротность резонатора и в то же время наделяет резонатор рядом новых свойств. В частности, открытый резонатор с прямоугольной канавкой, прорезанной вдоль хорды плоского зеркала, при малой ширине канавки ( $b \leq \lambda_0/4$ ) вследствие снятия поляризационного вырождения типов колебаний обладает двумя независимыми спектрами частот. При смешанном возбуждении, когда щель связи расположена по отношению к канавке под углом, близким к  $45^\circ$ , открытый резонатор эквивалентен двум связанным резонаторам, парциальные частоты одного из которых сохраняются, а второго — перестраиваются в широких пределах изменением глубины канавки. Это свойство может найти применение для создания высокодобротных резонаторов миллиметрового диапазона с двугорбой резонансной кривой, используемых для фильтрации сигналов или в качестве дискриминаторов частоты.

Локальные неоднородности в канавке частично преобразуют поле резонатора в квазисобственные волны канавки, что сильно снижает его добротность. Однако при соответствующем размещении нескольких неоднородностей можно избежать возбуждения этих волн и тем самым обеспечить эффективное функционирование локальных структур в открытом резонаторе.

На примере включения в канавку ДБШ показано, что подобное устройство успешно может быть использовано как селективный детектор миллиметрового диапазона волн.

В исследуемых резонаторах одновременно должны выполняться два резонансных условия, обеспечиваемых выбором расстояния между зеркалами и высотой протяженных неоднородностей, что позволяет получить перестраиваемый ОР с эффективной фильтрацией продольных типов колебаний.

В заключение авторы выражают благодарность В. Н. Кочину и С. А. Просвирнину за помощь в проведении расчетов сечения рассеяния волны на экране с канавкой, а также А. И. Шубному за помощь в проведении измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бородкин А. И., Булгаков Б. М. и др.—Письма в ЖТФ, 1979, 5, вып. 5, с. 285.
2. Скресанов В. Н., Фисун А. И. Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума по миллиметровым и субмиллиметровым волнам.—Горький, 1980, 1, с. 80.
3. Коцержинский Б. А., Першин Н. А., Гараненко В. П. Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума по миллиметровым и субмиллиметровым волнам.—Горький, 1980, 1, с. 77.
4. Бородкин А. И., Булгаков Б. М., Смородин В. В.—Письма в ЖТФ, 1980, 6, вып. 19, с. 1189.
5. Вертий А. А., Деркач В. Н. и др.—Изв. вузов — Радиофизика, 1981, 24, № 1, с. 76.
6. Булгаков Б. М., Леонов Ю. И., Фурсов А. М.—Радиотехника, Республ. межвед. научн.-техн. сб.—Харьков, 1980, вып. 53, с. 3.
7. Литвиненко Л. Н., Просвирнин С. А., Шестопапов В. П.—Радиотехника и электроника, 1977, 22, № 3, с. 479.

Институт радиофизики и электроники  
АН УССР

Поступила в редакцию  
9 декабря 1981 г.,  
после переработки  
2 ноября 1982 г.

### INVESTIGATION OF OPEN RESONATORS WITH RECTANGULAR INHOMOGENEITIES ON THE MIRROR

*B. M. Bulgakov, V. N. Skresanov, A. I. Fisun*

An open semisymmetric resonator is investigated with extended rectangular inhomogeneities on a plane mirror in the form of a ditch, jut and step with transverse dimensions comparable with the wavelength and longitudinal dimensions coming out of the limits of the field spot on the mirror. A good agreement has been obtained of the measured  $Q$ -factor as a function of the ditch dimensions on the plane mirror and the  $Q$ -factor calculated on the basis of the problem solution of  $H$ -polarized wave diffraction by the plane with the same ditch. It is found out experimentally that the inhomogeneities in the ditch excite an electromagnetic wave propagating along it. An effect of this wave on the losses in the resonator is studied.

### Аннотации депонированных статей

УДК 621.372.826

### ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД: ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА ПАРЦИАЛЬНЫХ ПЛОСКИХ ВОЛН

*А. Д. Титов, А. П. Хапалюк*

На основе концепции Бриллюэна о парциальных плоских волнах, обобщенной на неоднородные волны, получены дисперсионные соотношения (в виде систем трех комплексных трансцендентных уравнений) и выражения для электромагнитных полей 16 типов гибридных мод, направляемых симметричным прямоугольным диэлектрическим волноводом, в общем случае наличия поглощения в волноведущем стержне и в окружающей его среде. Исследованы случаи точного аналитического решения дисперсионных систем, когда параметры сред должны удовлетворять определенным условиям. Показано, что системы имеют также приближенные решения при близких показателях преломления (слабонаправляющий волновод). В этом случае два из 16 типов гибридных мод обобщают известные плосковолновые решения Маркатили на комплексные показатели преломления и произвольные соотношения между поперечными и продольной постоянными распространения. Предложена классификация гибридных модовых решений.

*Статья депонирована в ВИНТИ,  
рег. № 1222—83. Деп. от 9 марта 1983 г.*