

КОМПЛЕКТ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

© 2013 г. В. А. Карпович, Т. В. Гаевская*, В. Н. Родионова, О. В. Танана

Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета (БГУ)

Беларусь, 220030, Минск, ул. Бобруйская, 11

**НИИ физико-химических проблем БГУ*

Беларусь, 220030, Минск, ул. Бобруйская, 11

Поступила в редакцию 21.03.2012 г.

После доработки 13.09.2012 г.

Описан универсальный комплект широкодиапазонных высокочастотных измерительных резонаторов в диапазоне частот 0.6–180 ГГц, который может быть использован для физических исследований параметров различных сред, а также в спектроскопии, голографии, радиоастрономии, технике связи, физической электронике. Созданы с.в.ч.-резонаторы с диапазоном механической перестройки не менее 1/2-октавы, нагруженной добротностью не менее 10^5 , имеется возможность электронной подстройки частоты.

DOI: 10.7868/S0032816213030075

Особое место среди с.в.ч.-элементов всегда занимали высокочастотные с.в.ч.-резонаторы, используемые для стабилизации частоты генераторов, в качестве волномеров, фильтров, при измерении спектральных и флуктуационных характеристик сигналов, физических параметров материалов [1–3].

1. ВЫСОКОДОБРОТНЫЕ С.В.Ч.-РЕЗОНАТОРЫ С РАЗРЕЖЕННЫМ СПЕКТРОМ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

В с.в.ч.-диапазоне широко применяются резонатор различных типов: коаксиальные, цилиндрические, открытые и т.д. [4]. Основные требования, обычно предъявляемые к резонаторам: высокая собственная добротность, широкий диапазон перестройки (при отсутствии мешающих и вырожденных типов колебаний), возможность согласования со стандартными волноводами без дополнительной регулировки элемента связи в процессе перестройки. Возможности повышения добротности технологическими средствами (качество обработки поверхности, высокая точность изготовления и т.д.) в настоящее время практически исчерпаны. Применение сверхпроводимости и других средств криогенной техники в ряде случаев затруднительно. Физические методы повышения добротности связаны с переходом к многомодовому режиму, но при этом возникает проблема селекции мод.

Нами разработан комплект высокочастотных широкодиапазонных измерительных резонаторов с разреженным спектром собственных коле-

баний в диапазоне частот 0.6–180 ГГц, внешний вид которых показан на рис. 1.

В диапазоне частот 0.6–2 ГГц разработан неоднородный объемный резонатор — цилиндрический резонатор с коаксиальным выступом (рис. 2). Выполнена строгая методика электродинамического расчета собственных E_{0mn} -колебаний такого цилиндрического резонатора с коаксиальным выступом при учете конечной проводимости стенок. Расчет выполнен модифицированным методом вычетов, распространенным на задачу о собственных колебаниях.

Частотная перестройка резонатора осуществляется при помощи подвижного кольца. Для обеспечения работы резонатора в верхней части рабочего диапазона частот перестроечное кольцо располо-



Рис. 1. Комплект измерительных высокочастотных широкодиапазонных с.в.ч.-резонаторов.

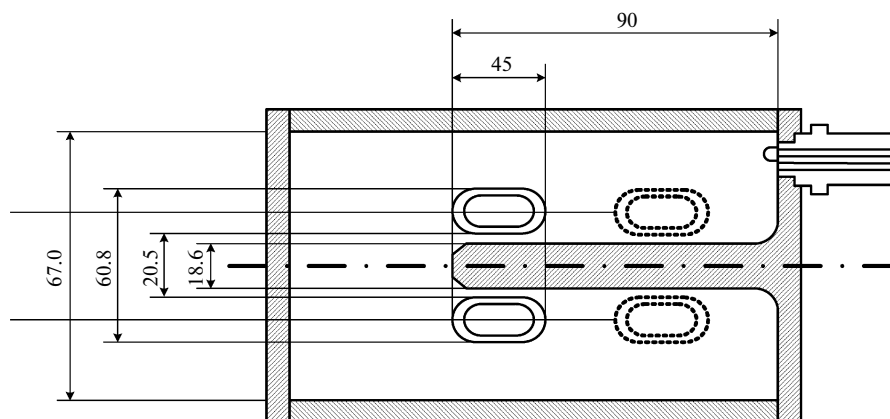


Рис. 2. Эскиз неоднородного резонатора в диапазоне частот 0.625–1.250 ГГц.

жено вдали от края коаксиального выступа. Такая конструкция позволила выровнять добротности резонатора по диапазону. Соответственно для нижней части рабочего диапазона частот перестроечное кольцо надвигается на внутренний проводник. Разработанные неоднородные резонаторы в 3–4 раза более добротны, чем коаксиальный резонатор на TEM_1 -колебании, перестраиваемый бесконтактным плунжером.

В частотном диапазоне от 2 до 37.5 ГГц спроектированы “многомодовые” цилиндрические резонаторы, использующие в различных участках частотного диапазона рабочие колебания нескольких типов (колебания H_{11n} и H_{01n} , где $n = 1–12$). В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах радиоволн разработаны “многомодовые” квазиоптические открытые резонаторы (о.р.) со сферическими зеркалами.

В данном классе резонаторов выполнено разрежение спектра с помощью фильтрующих периодических структур. В качестве такой структуры использовалась ленточная решетка, расположенная над гладким экраном. Одним из достоинств такой структуры является высокая технологичность — применение интегральной технологии (напыление металлических лент на диэлектрическую подложку с небольшой диэлектрической проницаемостью). На сферические зеркала о.р. установлены плоские диэлектрические пластины из поликора с напыленной на их поверхности ленточной дифракционной решеткой. Решетки на обоих зеркалах ориентированы строго параллельно друг другу и перпендикулярно оси резонатора. Перестройка резонатора осуществляется при помощи плунжера, перемещающего одно из зеркал.

Разработан численный алгоритм расчета поглощения в такой структуре при падении плоской волны E- и H-поляризации. Обнаружен эффект резонансного поглощения, который и был ис-

пользован для селекции мод в о.р. Резонатор возбуждается волноводом стандартного сечения, расположенным вдоль оси резонатора, через диафрагму с узкой щелью. Рабочими видами колебаний в о.р. являются колебания TEM_{00q} ($q = 2, 4, \dots, 12$). Подавляются вырожденные типы колебаний TEM_{2nq} , TEM_{4nq} и т.д. При наличии решеток структура спектральной линии соответствует возбуждению одной моды с нагруженной добротностью >50000 . Снятие решеток приводит примерно к двукратному уширению спектральных линий, кроме того, спектральные линии приобретают сложную структуру, характерную для сильного взаимодействия нескольких добротных мод с близкими резонансными частотами.

В диапазоне от 37.5–78.33 ГГц параллельно с многомодовыми открытыми резонаторами предлагается к практическому применению новый класс высокодобротных резонаторов — гребенчатые резонаторы [5], основанные на эффекте аномально малого затухания H-поляризованных волн в периодических структурах. Рабочими колебаниями данного класса резонаторов являются колебания типа E_{0mn} , представляющие собой суперпозицию прямого и встречного волновых пучков с аксиальной симметрией, электрически поляризованных вдоль гребней периодической структуры.

Выигрыш в поглощении гребенчатой поверхностью по сравнению с однородной будет иметь место для волновых пучков, угол скольжения которых над поверхностью достаточно мал. При выполнении условия — длина резонатора больше внутреннего радиуса — потери в боковой поверхности будут преобладающими, а их уменьшение за счет гофрировки значительно увеличит полную добротность [6] по сравнению с гладкостенным цилиндрическим резонатором. Это имеет место при условии $L > b$ (см. рис. 3); в наших резонаторах $L/b = 2–4$. Фильтрация паразитных колебаний в данном классе резонаторов обусловле-

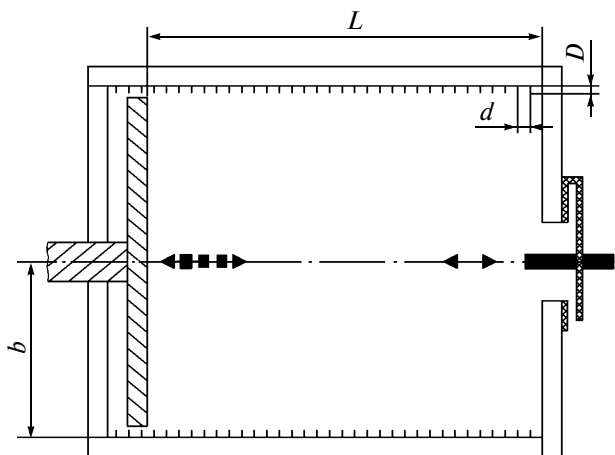


Рис. 3. Высокодобротный гребенчатый резонатор.

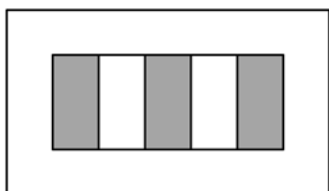


Рис. 5. Конфигурация решетки связи.

на двумя физическими механизмами: способом возбуждения, затрудняющим возбуждение всех мод, кроме E_{0mn} , и действием гребенчатой структуры, увеличивающей поглощение для остальных мод, если они появляются из-за деформации стенок резонатора или перекоса возбуждающего штыря.

Гребенчатый резонатор, эскиз которого приведен на рис. 3, представляет собой полый цилиндр, на внутренней боковой поверхности которого имеется периодическая структура (D – глубина канавки, d – ее ширина). Торцевые крышки имеют гладкую поверхность и могут быть как плоскими, так и сферическими с радиусом кривизны $3b$. Одна из крышек – подвижная для перестройки резонатора в диапазоне частот. Возбуждение резонатора производится тонким штырем, который связан со стандартным прямоугольным волноводом через волноводно-коаксиальный переход. Собственная добротность таких резонаторов достигает 10^6 .

Конфокальные о.р. со сферическими зеркалами имеют близкую добротность при большем на порядок объеме. При равенстве объемов добротность гребенчатого резонатора в несколько раз выше, чем у о.р., при примерно одинаковой плотности спектра.

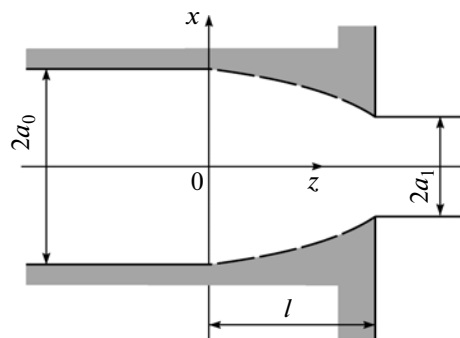


Рис. 4. Модельная задача для электродинамического анализа элемента связи.

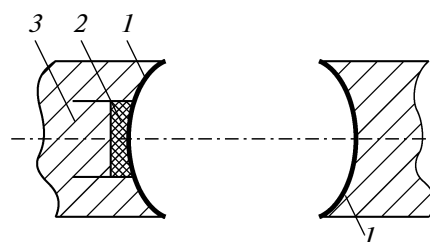


Рис. 6. Открытый резонатор с решетчатым элементом связи. 1 – зеркала о.р.; 2 – элемент связи; 3 – возбуждающий волновод.

Определены и разработаны принципы согласования высокодобротных с.в.ч.-резонаторов с одномодовыми волноводами в каждом стандартном диапазоне частот (коаксиальные и прямоугольные волноводы согласно ГОСТ 13317-89 “Элементы соединения СВЧ трактов радиоизмерительных приборов”), обеспечивающими к.с.в.н. < 1.8 без механической и электрической подрегулировки.

Связь волновода с резонаторами (РВЦ 501, 511, 521, 531, см. таблицу) выполнена через плавные волноводные переходы, их расчет проведен с использованием модели [7], в которой реальный элемент связи заменен его прототипом, вместо узких “электрических” стенок используются “магнитные” стенки (рис. 4).

Проектировались и исследовались клинообразные нерегулярные переходы с $a(z) = a_0 + (a_1 - a_0)z/l$ [7].

Технологические трудности изготовления бездиафрагменных элементов связи резко возрастают с укорочением длины волны. В коротковолновом диапазоне в качестве элемента связи использованы полупрозрачные решетки (рис. 5), нанесенные на диэлектрическую подложку (РВО 101, 111, 121, 131, таблица) [8]. На рис. 6. представлена конструкция открытого резонатора с решетчатым элементом связи.

Комплект широкодиапазонных измерительных резонаторов (в условных обозначениях моделей резонаторов буквы обозначают: Р – резонатор, В – высокодобротный, О – открытый, Ц – цилиндрический, Г – гребенчатый)

Модель	Диапазон, ГГц	Тип резонатора	Канал	Добротность, не менее	К.с.в.н., не более	Вес, кг
РВЦ241	0.60–1.20	Неоднородный	Коаксиал	14000	1.2	4.5
РВЦ251	1.07–2.14	То же	То же	18000	1.3	3.8
РВЦ311	2.0–3.0	Цилиндрический	Волновод	22000	1.4	8.7
РВЦ321	3.0–4.0	То же	То же	28000	1.5	13.7
РВЦ331	4.0–5.2	»	»	55000	1.6	11.2
РВЦ371	4.9–5.64	»	»	63000	1.6	9.5
РВЦ401	5.64–7.2	»	»	47000	1.6	6.5
РВЦ411	6.93–8.15	»	»	49000	1.5	5.4
РВЦ421	7.6–9.8	»	»	52000	1.4	5.5
РВЦ451	9.4–12.05	»	»	54000	1.6	4.5
РВЦ061	8.15–12.05	»	»	60000	1.5	6.6
РВЦ461	12.05–15.4	»	»	62000	1.7	3.7
РВЦ481	15.4–17.44	»	»	62000	1.7	3.5
РВЦ071	12.05–17.44	»	»	62000	1.7	5.1
РВЦ501	17.44–21.6	»	»	52000	1.7	2.1
РВЦ511	21.6–25.95	»	»	58000	1.8	2.0
РВЦ521	25.95–32.0	»	»	62000	1.8	1.7
РВЦ531	32.0–37.5	»	»	60000	1.8	1.6
РВГ531	32.0–37.5	Гребенчатый	»	80000	1.5	3.8
РВГ541	37.5–47.0	То же	»	84000	1.5	3.5
РВГ551	47.0–53.57	»	»	88000	1.45	3.3
РВО101	37.5–53.57	Открытый квази-оптический	»	66000	1.5	5.3
РВО111	53.57–78.33	То же	»	79000	1.8	4.9
РВО121	78.33–118.1	»	»	82000	1.6	4.1
РВО131	118.1–178.4	»	»	85000	1.6	3.7

На рис. 7 приведены сравнительные экспериментальные данные нагруженной добротности Q_n резонатора с элементом связи на основе плоской решетки и нагруженной добротности резонатора с диафрагменным элементом связи в диапазоне 78.33–118.1 ГГц. Анализируя результаты, можно констатировать, что применение решетки практически не ухудшило нагруженную добротность резонатора.

Производство таких элементов связи выполнено на основе интегральной технологии.

Разработан универсальный комплект широкодиапазонных измерительных резонаторов “на отражение” в диапазоне частот 0.6–178.4 ГГц, основные технические характеристики которого приведены в таблице.

Данные модели резонаторов модифицированы для использования “на проход” и имеют аналогичные характеристики.

К.с.в.н. резонаторов определялся (“по точкам”) по стандартным измерительным схемам с использованием измерительных линий (Р1-34, Р1-40, соответствующих рабочему диапазону длин волн), при этом погрешность измерений достигала 1.5%. Измерения к.с.в.н. можно автоматизировать, используя для этой цели панорамные измерители к.с.в.н. и ослабления в режиме ручной перестройки частоты (Р2-124), но погрешность измерений в этом случае возрастает до 10%. Измерение добротности резонаторов осуществлялось методом расстройки, при котором измеряются три частоты: резонансная и две частоты половинной мощности. Погрешность измерений не превышала 2.5%. В ка-

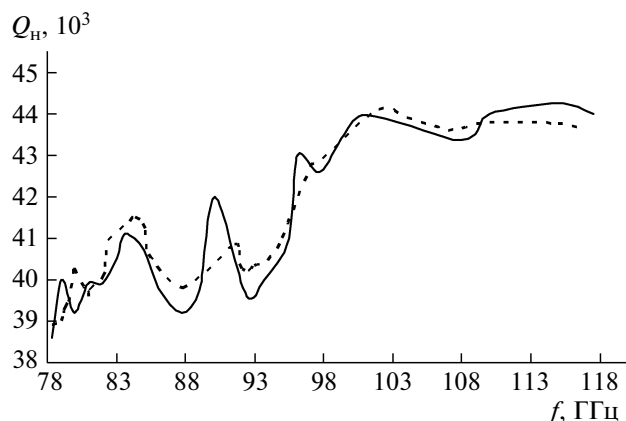


Рис. 7. Зависимость от частоты нагруженной добротности резонатора с различными устройствами связи: с плоской щелевой решеткой (сплошная линия), с диафрагменным устройством связи (штриховая).

честве источника сигнала использовались гетеродины с нестабильностью частоты не хуже 10^{-6} .

Резонаторы изготовлены из термостабильного материала 32 НКД (“Суперинвар”), имеют небольшой вес и малые размеры. Имеется функция электронной подстройки частоты.

2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ВЫСОКОДОБРОТНЫХ ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Для автоматизации процесса перестройки частоты резонаторов часто применяют нелинейные элементы (ферритовые вставки, сегнетоэлектрики, полупроводниковые диоды). Основное достоинство полупроводниковых диодов — низкое управляющее напряжение. Однако значительные активные потери, характеризующиеся невысоким значением собственной добротности ($Q \approx 200-500$), не позволяют вводить полупроводниковые диоды во внутрь резонаторов. Кроме того, большая мощность, рассеиваемая на диоде, может привести к его электрическому повреждению. Для обеспечения связи полупроводникового диода с высокодобротным резонатором так, чтобы диод вносил малые потери в резонатор и одновременно обеспечивал достаточную связь с резонатором для электронной подстройки частоты, нами были разработаны специальные секции. Секции встроены во все резонаторы.

Конструктивно варакторная секция выполнена в виде короткозамкнутого на одном конце отрезка круглого гребневого волновода длиной не более $\lambda_n/4$ (λ_n — нижняя частота перестройки резонатора), совмещенного с внутренней поверхностью резонатора своим разомкнутым концом (рис. 8). Варикап установлен перпендикулярно оси гребневого волновода на расстоянии $\lambda_v/8$ от

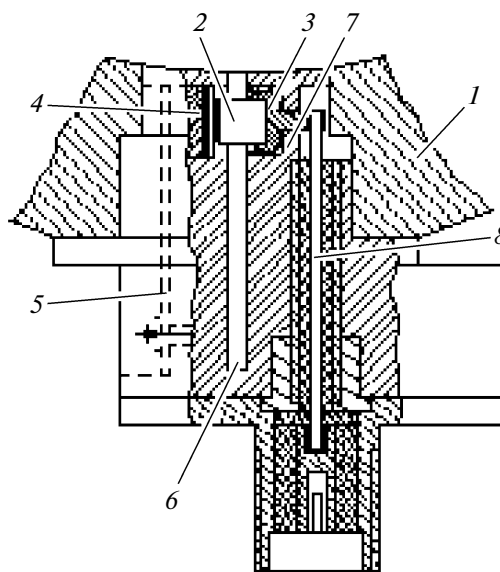


Рис. 8. Конструкция секции с варикапом. 1 — поверхность резонатора; 2 — варикап; 3 — фильтр с.в.ч.; 4 — прижимающая втулка; 5 — пружинящая планка; 6 — волновод; 7 — гребни волновода; 8 — микрокабель.

его разомкнутого конца, где λ_v — верхняя частота перестройки резонатора. Так как гребневый волновод обладает большей широкополосностью, чем обычный стандартный волновод, секция обеспечивает оптимальную связь варикапа с резонатором в широком диапазоне его перестройки. Варикап размещен в секции таким образом, что его корпус находится в гребнях секции и не выступает в полость резонатора. Между гребнями секции находится только активный элемент — кристалл варикапа. Это позволило исключить паразитные низкодобротные резонансы, обусловленные емкостью и индуктивностью корпуса, и сохранить высокую добротность рабочих мод резонатора. Диаметр отверстия в крышке или боковой поверхности резонатора равен внутреннему диаметру секции, что уменьшает возмущение электромагнитного поля в резонаторе и также способствует сохранению высокой добротности.

На рис. 8 показано включение секции с варикапом в боковую поверхность цилиндрического резонатора. Внешняя поверхность гребней 7 является частью внутренней поверхности резонатора 1 (т.е. секция расположена “заподлицо” с внутренней поверхностью корпуса резонатора).

Секция с варикапом позволила обеспечить скорость автоматической электронной перестройки частоты 1 ГГц/мс, при этом снижение нагруженной добротности резонаторов было столь незначительным, что по величине было сравнимо с погрешностью измерений.

Внутренние поверхности с.в.ч.-резонаторов часто покрывают серебром или золотом. Высокие

требования по точности изготовления с.в.ч.-резонаторов по чистоте внутренней поверхности, по стабильности размеров в процессе эксплуатации, а также повышенные механико-климатические требования заставили разработать и внедрить в данном комплекте с.в.ч.-резонаторов коррозионно-стойкие дешевые и надежные электропроводящие покрытия, не намного уступающие по характеристикам серебряным и золотым покрытиям.

Эти покрытия характеризуют высокая электропроводность (удельное сопротивление $1.7 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$) и повышенная коррозионная стойкость (по устойчивости к климатическим воздействиям резонаторы удовлетворяют нормам, установленным для приборов группы 1.1. ГОСТ РВ 20.57.306-98) за счет контролируемого изменения фазового и химического состава, а также объемного и поверхностного модифицирования ингибиторами. В основе этих покрытий лежит электрохимическое осаждение сплава Ni-P, а затем нанесение оксидных и органических микрогетерогенных пленочных покрытий для повышения коррозионной стойкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Collin R.E.* Foundations for Microwave Engineering. N.Y.: Wiley Interscience, 2001.
2. *Edwards T.C., Steer M.B.* Foundations of Interconnect and Microstrip Design. Chichester: John Wiley, LTD, 2000.
3. *Noyan Kinayan, Aksun M.I.* Modern Microwave Circuits. Norwood: Artesh House, Inc, 2005.
4. *Gaevskaya T.V., Karpovich V.A., Rodionova V.N.* // Int. J. of Microwave Science and Technology. 2011. V. 12. P. 89.
5. *Karpovich V., Rodionova V., Slepyan G.* // Electromagnetics. 2004. V. 24. № 7. P. 515.
6. *Oliner A.A.* // IRE Trans. Microw. Theory Tech. 1955. № 3. P. 134.
7. *Slepyan G.Ya., Skresanov V.N., Rodionova V.N. et al.* // J. Communications Technology and Electronics. 2008. V. 53. № 2. P. 184.
8. *Карпович В.А., Слепян Г.Я., Родионова В.Н., Филиненок О.В.* // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 11. С. 1303.