

И. Н. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук,
Н. О. ГНЕСЬ, А. С. ГНЕСЬ

РЕГУЛИРУЕМЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ЗАПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ

Объемные резонаторы являются одними из наиболее чувствительных инструментов для исследования электрофизических характеристик различных веществ, определяемых на основе соотношений, в которые входят значения добротности и резонансной частоты, измеренные различными методами. В качестве $Q_{изм}$ обычно принимается значение нагруженной добротности, которое вычисляется по формуле

$$Q_n = \frac{Q_0}{1 + \sum_{i=1}^n \beta_i}, \quad (1)$$

где Q_0 — собственная добротность объемного резонатора, характеризующая потери в самом резонаторе и в исследуемом веществе; β_i — коэффициент связи, $\beta_i = Q_0/Q_{вн}$ ($Q_{вн}$ — внешняя добротность, зависящая от потерь во внешних цепях).

При малых изменениях Q_0 и $\sum_{i=1}^n \beta_i \ll 1$ можно считать, что $Q_{изм} = Q_n \approx Q_0$, или $\Delta Q_{изм} = \Delta Q_n \approx \Delta Q_0$. Однако на практике Q_0 при помещении в резонатор исследуемого вещества может уменьшаться в несколько раз, а в случае исследования поверхностного сопротивления сверхпроводников изменение Q_0 составит примерно $10^3 - 10^4$ [1]. Соответственно значение $\sum_{i=1}^n \beta_i$ также будет меняться в широких пределах и уже нельзя утверждать, что $\Delta Q_n \approx \Delta Q_0$. Для уменьшения погрешности измерения ΔQ_0 необходимо использовать дополнительные схемы постоянного контроля значения β_i или, что значительно проще, предусмотреть в конструкции измерительного резонатора регулируемые в широких пределах элементы связи, которые позволяют в течение всего процесса измерений выполнять условие $\sum_{i=1}^n \beta_i \ll 1$.

В статье рассмотрены возможности использования запредельных волноводов регулярного и нерегулярного типов при создании регулируемых в широких пределах элементов связи.

В коаксиальных линиях регулируемый элемент связи представляет собой отрезок запредельного круглого волновода, один конец которого соединен с резонатором, а в другой вставляется

перемещаемая коаксиальная линия. Амплитуда волны в за-
предельном волноводе ($\lambda > \lambda_{кр}$) уменьшается по экспоненциальному
закону [2]:

$$E(z) = E_0 \exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda_{кр}} \sqrt{1 - \lambda_{кр}^2 / \lambda^2} z\right), \quad (2)$$

где E_0 — амплитуда волны на входе запредельного волновода;
 $\lambda_{кр}$ — критическая длина волны запредельного волновода на
рабочем типе волны; λ — рабочая длина волны; $E(z)$ — ампли-
туда волны при некотором значении координаты z , которая
выбирается вдоль оси запредельного волновода и коаксиальной
линии.

Передвигая коаксиальную линию вдоль оси z , можно изме-
нять связь с резонатором. Коэффициент связи резонатора с ли-
нией передачи через запредельный волновод может быть записан
в виде [3]:

$$\beta_i = cn^2 \quad (3), \quad \text{где } n = \exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda_{кр}} \sqrt{1 - \lambda_{кр}^2 / \lambda^2} z\right); \quad (4)$$

c — константа, равная коэффициенту связи с резонатором при
 $z=0$. Для удобства будем в дальнейшем предполагать $c=1$.

Если коаксиальная линия заканчивается в запредельном
волноводе петлей, то связь с резонатором будет осуществляться
на волне H_{11} , для которой $\lambda_{кр} = 3,41 R$ (R — радиус запредель-
ного волновода).

При этом

$$\beta_i = \exp\left[-\frac{3,68}{R} \sqrt{1 - 11,8 (R/\lambda)^2} z\right]. \quad (5)$$

Если запредельный волновод возбуждать штырем, в нем возни-
кает волна E_{01} , для которой $\lambda_{кр} = 2,62R$. Тогда

$$\beta_i = \exp\left[-\frac{4,8}{R} \sqrt{1 - 6,86 (R/\lambda)^2} z\right]. \quad (6)$$

В случае $\lambda \gg \lambda_{кр}$ соотношения (5) и (6) примут вид

$$\beta_{iH_{11}} = \exp\left(-\frac{3,68}{R} z\right); \quad \beta_{iE_{01}} = \exp\left(-\frac{4,8}{R} z\right). \quad (7)$$

Таким образом, регулируемые элементы связи на основе пере-
мещаемых коаксиальных линий и запредельных круглых волно-
водов позволяют изменять связь с резонатором в широких
пределах. Относительное ее изменение легко оценивается с по-
мощью соотношений (5) — (7), но необходимо постоянно обе-
печивать хороший омический контакт наружного проводника
коаксиальной линии с поверхностью запредельного волновода,
что является довольно сложной практической задачей.

В волноводных линиях коэффициент связи через запредельный
прямоугольный волновод также можно определить с помощью

соотношений (3), (4), только при $\lambda_{кр} = 2a$ (a — размер широкой стенки волновода), поскольку основным типом волны будет H_{10} :

$$\rho_z = \exp \left[-\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - 4(u/\lambda)^2} z \right]. \quad (8)$$

Значение β_z в таком запредельном волноводе можно регулировать с помощью диэлектрика, вводимого в запредельный участок [4]. При этом диэлектрическая проницаемость

$$\varepsilon = (\lambda/2a)^2. \quad (9)$$

Рассмотрим запредельный прямоугольный волновод, длина которого $z = 10$ мм, размер широкой стенки $a = 10$ мм и рабочая

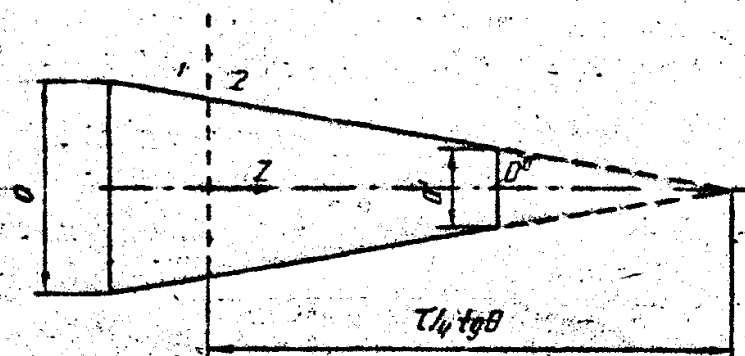


Рис. 1

длина волны $\lambda = 30$ мм. Из формулы (8) получим $\beta_z \approx 0,01$, а из условия (9) $\varepsilon \approx 2,25$. Следовательно, используя вставку из диэлектрика (фторопласт — 4) с $\varepsilon \approx 2,25$, перемещаемую в запредельном волноводе с выбранными размерами, можно изменять значения коэффициента связи в 100 раз.

Переход от стандартного волновода к запредельному осуществляется плавно, чтобы избежать нежелательных дополнительных переотражений в линиях связи. При этом появляется участок нерегулярного волновода, который так же будет влиять на значение коэффициента связи. Нерегулярный волновод делится на два отрезка (рис. 1). Один из них расположен до плоскости отсечки и не вносит заметного затухания в амплитуду распространяющейся волны. Второй расположен за плоскостью отсечки и является нерегулярным запредельным волноводом. Координата плоскости отсечки будет определяться из условия равенства $\lambda_{кр}$ для данного сечения волновода и рабочей длины волны λ . Плоскость отсечки находится на расстоянии от начала нерегулярного волновода, равном $\left(\frac{2a - \lambda}{4 \operatorname{tg} \theta} \right)$.

Если представить нерегулярный запредельный волновод в виде большого количества соединенных друг с другом регулярных волноводов длиной Δz , то, используя формулы (3), (4), запишем для коэффициента связи соотношение

$$\beta_z = \exp \left\{ - \sum_{k=1}^n \frac{\pi}{(\lambda/4 \operatorname{tg} \theta - k\Delta z) \operatorname{tg} \theta} \sqrt{1 - \frac{[4(\lambda/4 \operatorname{tg} \theta - k\Delta z) \operatorname{tg} \theta]^2}{\lambda^2}} \Delta z \right\}, \quad (10)$$

где $n = z/\Delta z$.

На рис. 2 изображены графики $\beta(z)$, вычисленные для за-
предельных нерегулярных волноводов по формуле (10). При
этом $\lambda = 32$ мм, $\Delta z = 1$ мм, $a = 23$ мм, $\theta = 3; 6; 9; 12; 15^\circ$. Линии
11' и 22' соединяют значения β для размеров $a = 12; 14$ мм
соответственно. На рис. 3 показана зависимость $\beta(\lambda)$ для пере-

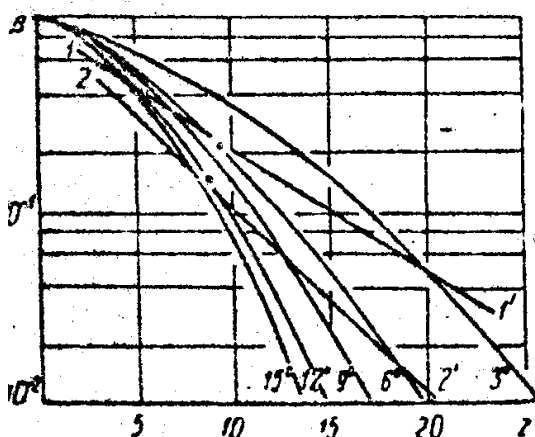


Рис. 2

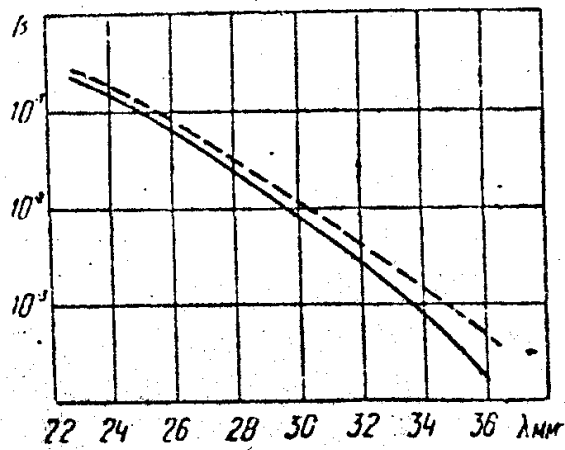


Рис. 3

гулярного волновода с входным сечением 23×10 мм и выход-
ным — 10×10 мм при $\theta = 9^\circ$. Перепад значений β в рабочем
диапазоне длин волн стандартного волновода составляет около
трех порядков.

Связь в нерегулярном волноводе так же, как и в регулярном,
можно изменять с помощью диэлектрической пластины, выдви-
гаемой в запредельный участок. Перемещают пластину через
узкую прорезь в середине широкой стенки волновода.

Величину β в запредельном нерегулярном волноводе при
известных размерах z и широкой стенке на выходе волновода
 a' (см. рис. 1) можно оценить более простым соотношением,
чем (10):

$$\beta = \exp \left[- \frac{8\pi}{\lambda + 2a'} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda + 2a'}{2\lambda} \right)^2} z \right]. \quad (11)$$

Однако с увеличением z значения β , вычисленные по соотноше-
нию (11), будут более завышены, чем β , определенные по фор-
муле (10). На рис. 3 пунктирной линией показана зависимость
 $\beta(\lambda)$, рассчитанная по формуле (11).

Экспериментально исследовался нерегулярный волновод пря-
моугольного сечения с входными размерами 23×10 мм, выход-
ными — $12,5 \times 10$ мм, длиной 77 мм на рабочей длине волны
 $\lambda = 34$ мм. Длина запредельного участка нерегулярного волно-
вода z составляла при этом 32,5 мм. Оценивая величину β по

соотношениям (10), (11), имеем $\beta = 9,36 \cdot 10^{-4}$; $1,02 \cdot 10^{-3}$ соответственно.

Измерения производили следующим образом (рис. 4): сигнал СВЧ генератора 1 через ферритовый вентиль 2 подавался в плечо *H* двойного волноводного тройника, к симметричным плечам которого подключались согласованная нагрузка 3 и исследуемый нерегулярный волновод 4 с перестраиваемым объемным резонатором 5. Настраивая детекторную секцию 7, подключаемую к плечу *E* тройника, на максимальную чувствительность,

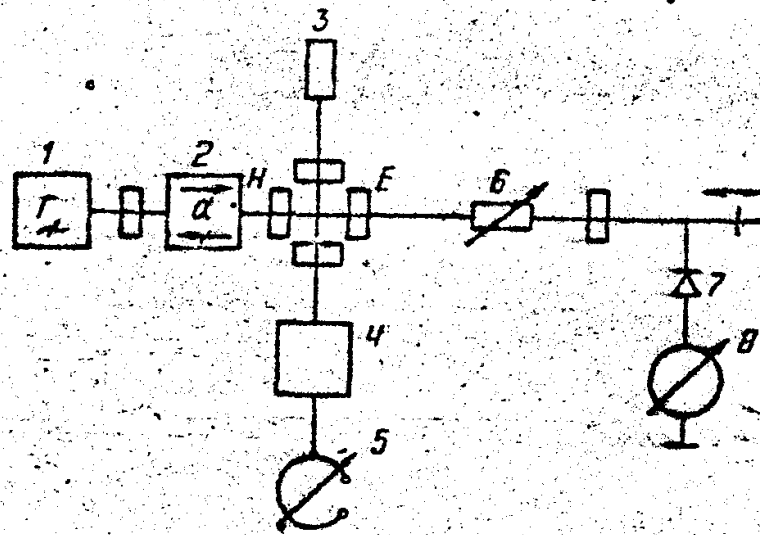


Рис. 4

устанавливаем с помощью калиброванного аттенюатора 6 одинаковые показания на стрелочном приборе 8 при настроенном на рабочую частоту и расстроенном резонаторе 5. Коэффициент связи [5]

$$\beta = \frac{1 - |\Gamma|}{1 + |\Gamma|}, \quad \beta < 1; \quad \beta = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}, \quad \beta > 1.$$

Коэффициент отражения $|\Gamma| = 1/10^{N/20}$, где N — разность показаний калиброванного аттенюатора 6 при настроенном и расстроенном резонаторе 5.

Измерены характеристики нерегулярного волновода с диэлектрической вставкой из фторопласта и без вставки. Получены соответственно величины $\beta = 17$ и $\beta = 1,65 \cdot 10^{-2}$. Значение $\beta = 17$ для волновода с диэлектрической вставкой соответствует $s = 17$ в соотношении (3). Нормируя значение константы к единице, получаем $\beta = 9,7 \cdot 10^{-4}$, что согласуется с величинами β , найденными из формул (10), (11).

Таким образом, элементы связи на основе запердельных круглых волноводов с перемещаемыми коаксиальными линиями обеспечивают большой диапазон регулирования связи и сохраняют ее неизменной в широком диапазоне рабочих частот, поскольку в таких конструкциях можно удовлетворить условию

$\lambda \gg \lambda_{кр}$. Тогда величина β определится соотношениями (7), не зависящими от рабочей длины волны.

Поскольку регулируемые элементы связи используются в основном в сочетании с узкополосными устройствами типа резонансных систем, с успехом могут быть применены системы связи на основе запердельных регулярных и нерегулярных волноводов, перестраиваемые с помощью диэлектрических вставок. Оценка величины β при этом производится соотношениями (10), (11), а ε — (9). Связь в таких устройствах будет более стабильной во время перестройки, поскольку отпадает необходимость обеспечения хорошего омического контакта между перемещаемыми частями элемента связи.

Список литературы: 1. Менде Ф. Ф., Бочдаренко И. Н., Трубицын А. В. Сверхпроводящие и охлаждаемые резонансные системы.— К.: Наук. думка, 1976.— 272 с. 2. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ.— М.: Высш. шк., 1970, т. 1.— 440 с. 3. Андросов В. В., Шедрин И. С.— Ускорители, 1979, вып. 18, с. 17—21. 4. Пул Ч.— Техник • ЭПР-спектроскопии.— М.: Мир, 1970.— 557 с. 5. Гинзтон Э. Л. Измерения на сантиметровых волнах.— М.: Иностран. лит., 1960.— 620 с.

Поступила в редколлегию 19.09.84.