

УДК 621.396

И. В. ИВАНОВ, О. Х. ГОНЗАЛЕС, А. А. ВЕТРОВ, ЧАН ЗОАН КУОИ

## СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ТИПА В СИСТЕМАХ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Диэлектрические резонаторы СВЧ из нелинейного сегнетоэлектрического материала в силу высокого значения  $\epsilon \gg 1$  занимают пренебрежимо малую долю объема волноводной системы и могут рассматриваться как точечные элементы, параметры которых меняются под действием электрического поля. Рассматривается применение подобных нелинейных элементов в амплитудных и фазовых модуляторах, коммутаторах, электрически-перестраиваемых фильтрах СВЧ, усилителе типа модулятор—демодулятор. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков может быть использована для автоматической стабилизации температуры подобных нелинейных элементов.

Проблема применения сегнетоэлектрических материалов в системах сверхвысоких частот привлекает в последние годы все большее внимание. В работах, посвященных системам СВЧ с сегнетоэлектриками, можно выделить три основных направления. Во-первых, это создание нелинейных элементов сосредоточенного типа — конденсаторов, применение которых в системах СВЧ аналогично применению параметрических полупроводниковых диодов. Во-вторых, это разработка систем на бегущих волнах, в которых сегнетоэлектрик применяется как нелинейная среда, заполняющая значительную часть внутреннего объема волноводной системы. Третий класс систем занимает промежуточное положение. Сегнетоэлектрический нелинейный элемент в этом случае имеет размеры порядка длины волны в материале и представляет собой диэлектрический (сегнетоэлектрический) резонатор.

Так как диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков весьма велика, нелинейный элемент занимает пренебрежимо малую долю внутреннего объема СВЧ системы и с точки зрения этой системы является точечным элементом. Активные и реактивные параметры подобного элемента меняются под действием электрического поля и определяются внутренними процессами в элементе, имеющими волновой характер. Нелинейный элемент с размерами порядка  $\lambda/\sqrt{\epsilon}$  представляет собой диэлектрический (сегнетоэлектрический) резонатор, тип колебания которого определяется его размерами и формой. Нелинейный элемент — сегнетоэлектрический резонатор имеет ряд преимуществ как по сравнению с сосредоточенными сегнетоэлектрическими конденсаторами СВЧ,

так и по сравнению с элементами, работающими на бегущих волнах и целиком заполняющими внутренний объем СВЧ системы.

Конденсаторы СВЧ диапазона должны иметь емкость порядка долей или единиц пикофарады, что при  $\epsilon \approx 10^3 - 10^4$  создает значительные технологические трудности [1, 2]. Системы СВЧ с сегнетоэлектрическим заполнением имеют весьма высокий входной коэффициент отражения, требуют громадных мощностей источников возбуждения [2, 3] и характеризуются большими абсолютными потерями энергии. Рассматриваемые в настоящей работе сегнетоэлектрические резонаторы, применяемые в качестве нелинейных элементов, просты в изготовлении, легко возбуждаются и отличаются высокой надежностью.

Одной из наиболее простых форм сегнетоэлектрического резонатора, легко сопрягаемого с коаксиальными системами, является отрезок радиальной линии, заполненной сегнетоэлектриком (рис. 1, а). Впервые эффект электрической протяженности подобной системы был отмечен применительно к проблеме измерения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков на СВЧ [4]. Если расстояние между электродами радиальной линии  $d$  меньше полволны в материале, то в радиальном резонаторе могут быть возбуждены лишь колебания типа ТЕМ. Вводя эквивалентные напряжения  $U$  и ток  $I$  в радиальной линии

$$U = E_z \cdot d, \quad I = 2\pi r H_\phi, \quad (1)$$

можно прийти к удобному для расчетов параметру — входному сопротивлению в данном сечении линии (при данном радиусе  $r$ ):

$$Z_{\text{вх}}(r) = \frac{E_z d}{2\pi r H_\phi}. \quad (2)$$

Если диэлектрик, заполняющий линию, имеет потери ( $\text{tg } \delta \neq 0$ ), то  $Z_{\text{вх}}(r)$  комплексно,  $Z_{\text{вх}}(r) = R_{\text{вх}}(r) + jX_{\text{вх}}(r)$ . Расчет в приближении малого поля СВЧ дает следующие значения для компонентов  $Z_{\text{вх}}(r)$ :

$$R_{\text{вх}} = \frac{120\pi}{c} f d (F \cos \theta + \Phi \sin \theta), \quad (3)$$

$$X_{\text{вх}} = \frac{120\pi}{c} f d (\Phi \cos \theta - F \sin \theta), \quad (4)$$

$$F(x, \theta) = \frac{U_0 V_1 - U_1 V_0}{x(U_1^2 + V_1^2)}; \quad \Phi(x, \theta) = \frac{U_0 U_1 - V_0 V_1}{x(U_1^2 + V_1^2)}. \quad (5)$$

где  $f$  — частота,  $c$  — скорость света,  $\theta = \delta/2$ ,  $x = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon} r$  — электрический радиус резонатора.  $U_0(x, \theta)$  и  $U_1(x, \theta)$  — это действительные, а  $V_0(x, \theta)$  и  $V_1(x, \theta)$  — мнимые компоненты функций Бесселя от комплексного аргумента:

$$\begin{aligned} J_0(xe^{j\theta}) &= U_0(x, \theta) - jV_0(x, \theta), \\ J_1(xe^{j\theta}) &= U_1(x, \theta) - jV_1(x, \theta). \end{aligned} \quad (6)$$

На рис. 1 зависимости  $R_{\text{вх}}(r)$  и  $X_{\text{вх}}(r)$  изображены для случая двух материалов: для монокристаллического титаната стронция, имеющего на частоте  $10^9$  гц тангенс угла потерь порядка 0,002 и керамического ВК-7 ( $\text{BaSrTiO}_3$ ), потери которого на порядок выше ( $\text{tg } \delta \approx 0,02$ ).

На рис. 2 даны зависимости  $R_{\text{вх}}$  и  $X_{\text{вх}}$  от напряжения смещения, подаваемого на электроды сегнетоэлектрического резонатора. Как следует из (3) — (6), при  $x = 2,405$   $X_{\text{вх}} = 0$  и меняет знак, а  $R_{\text{вх}}$  достигает минимума. Точка  $x = 2,405$  соответствует первому резонансу в элементе.

Это «последовательный» резонанс с минимальным входным сопротивлением. При  $x=3,83$  находится резонанс «параллельного» типа с максимумом входного активного сопротивления (рис. 1). В дальнейшем будет рассматриваться именно этот резонанс и исследоваться возможности практических применений нелинейных элементов радиального типа, имеющих радиус, соответствующий  $x=3,83$ , и перестраиваемых в окрестности этого резонанса. Однако,

поскольку диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков зависит от электрического поля весьма сильно, изменением поля

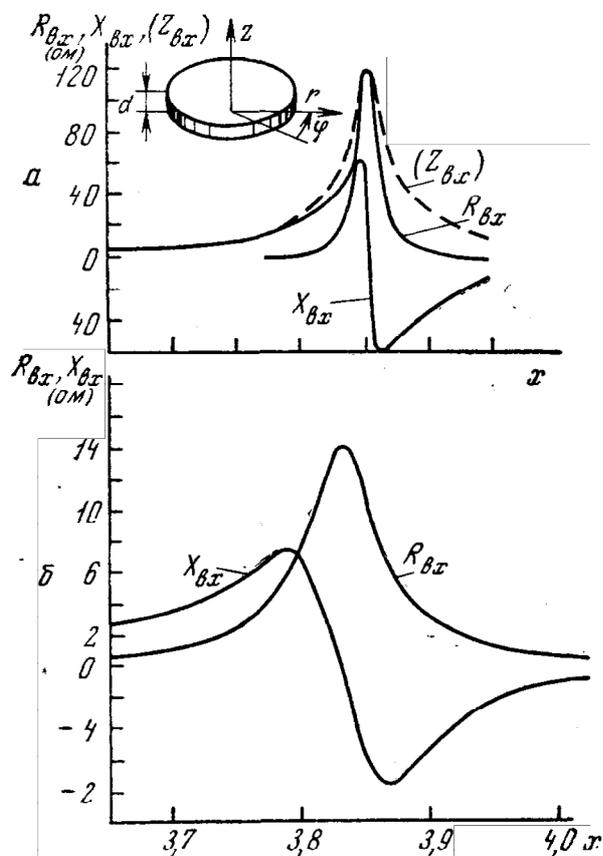


Рис. 1. Зависимость реактивного  $X_{вх}$  и активного  $R_{вх}$  компонентов входного сопротивления сегнетоэлектрического резонатора радиального типа от

$$x = \frac{[2\pi]}{\lambda} \sqrt{\epsilon r}.$$

а — резонатор из титаната стронция,  
б — резонатор из сегнетокерамики ВК-7

В частности, можно осуществить переключение элемента из режима параллельного резонанса в режим последовательного резонанса. Подобное переключение успешно применено в амплитудных коммутаторах, описанных в [2]. Как следует из рис. 1 и 2, окрестность параллельного резонанса характеризуется резкой зависимостью активной составляющей входного сопротивления радиального резонатора от  $x$ , следовательно от напряжения  $U_{=}$ , причем можно найти области, где  $\partial R_{вх}/\partial U_{=}$  велико, а  $X_{вх}$  меняется относительно мало. Пользуясь этим свойством резонатора, можно осуществить режим амплитудной модуляции проходящей волны при пренебрежимо малой фазовой модуляции.

Амплитудный модулятор представляет собой параллельный шлейф соответствующей длины с радиальным резонатором на конце. Длина шлейфа выбирается таким образом, чтобы скомпенсировать реактивную составляющую сопротивления, трансформированную в точку подключе-

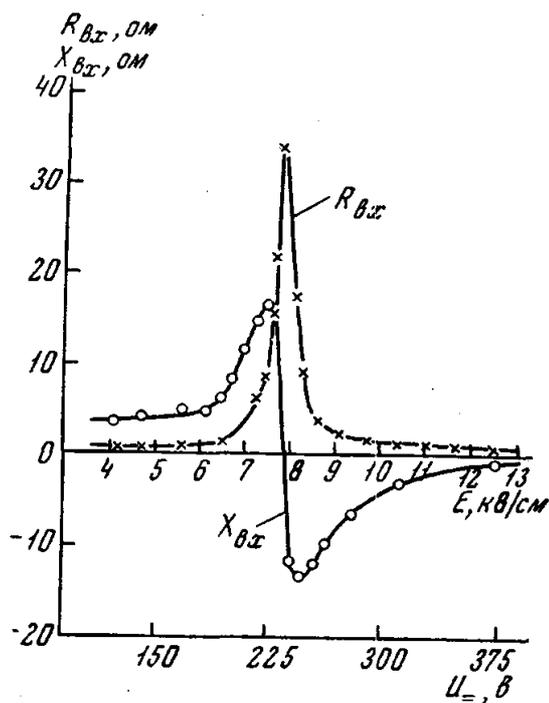


Рис. 2. Зависимость от смещения реактивного  $X_{вх}$  и активного  $R_{вх}$  компонентов входного сопротивления для резонатора из монокристалла титаната стронция (экспериментальные кривые).  
 $T=77^\circ\text{K}$

смещения можно добиться перестройки резонатора в более широких пределах.

ния шлейфа. Характеристика модулятора, т. е. зависимость коэффициента отражения по мощности в основной линии от напряжения на нелинейном элементе, приведена на рис. 3. Следует отметить высокую крутизну характеристики, являющуюся следствием резонансных свойств нелинейного элемента.

Весьма просто может быть решена и задача фазовой коммутации. Поместив нелинейный элемент на конце коаксиальной линии, можно осуществить электрическое переключение фазы коэффициента отражения между двумя значениями  $\varphi_1 = +\frac{\pi}{2}$  и  $\varphi_2 = -\frac{\pi}{2}$ . Действительно, фаза коэффициента отражения от конца линии, нагруженной на радиальный резонатор, определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2X'_{\text{вх}}}{|Z'_{\text{вх}}|^2 - 1},$$

где штрихованные величины — это сопротивления, приведенные к волновому сопротивлению линии. Из рис. 1, а видно, что симметрично относительно  $x=3,83$  имеются точки с равным значением  $|Z'_{\text{вх}}|$ , однако этим точкам соответствуют значения  $X'_{\text{вх}}$ , имеющие противоположные знаки. Используя линию с волновым сопротивлением, равным  $|Z'_{\text{вх}}|$ , можно получить  $\operatorname{tg} \varphi_{1,2} = \pm \infty$ , что соответствует  $\varphi_{1,2} = \pm \pi/2$ . Модуль коэффициента отражения при этом весьма близок к единице, ибо величина активного компонента входного сопротивления нелинейного элемента в точках, где  $\varphi_{1,2} = \pm \pi/2$ , мала. На рис. 4 приведена экспериментальная кривая зависимости сдвига фазы волны, отраженной от сегнетоэлектрического резонатора, который помещен на конце коаксиальной линии. Одновременно с фазовой характеристикой, изображенной на рис. 4, снималась и амплитудная характеристика фазовращателя. При напряжении смещения, соответствующем резонансу (на рис. 4 это напряжение равно 295 в), коэффициент отражения проходит через острый минимум. Однако при достаточной расстройке относительно резонанса ( $U = \leq 285$  в и  $U = \geq 305$  в на рис. 4) отражение от сегнетоэлектрического резонатора становится полным. Таким образом, при работе системы типа, изображенной на рис. 4, в режиме фазового коммутатора ( $\pm \pi/2$ ) паразитная амплитудная модуляция не наблюдается.

При введении распределенного нелинейного элемента в полый резонатор можно осуществить электрическую перестройку его частоты. Для коаксиального резонатора, изображенного на рис. 5, экспериментально получены характеристики перестройки частоты, изображенные на том же рисунке. Резонатор рассчитан таким образом, что парциальная частота коаксиальной полости, замкнутой некоротко в месте последующего по-

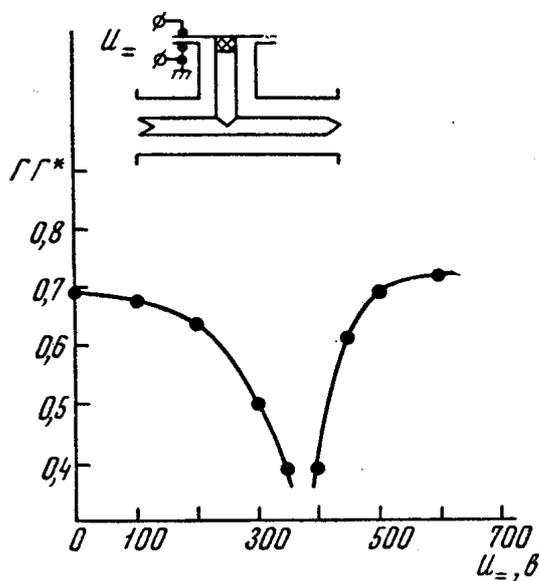


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения по мощности в основной линии от напряжения на сегнетоэлектрическом резонаторе из керамики ВК-7. Точка Кюри ВК-7  $\theta=0^\circ\text{C}$ , рабочая температура  $20^\circ\text{C}$

мещения нелинейного элемента, и частота параллельного резонанса нелинейного элемента ( $\chi=3,83$ ) совпадают. Система, состоящая из коаксиальной полости и помещенного внутрь полости сегнетоэлектрического резонатора, имеет спектр, состоящий из бесконечного числа пар собственных частот. Две ветви, изображенные на рис. 5, представляют собой зависимость от напряжения основной (наинизшей) пары частот. Как следует из рис. 5, в описываемой системе может быть реализована

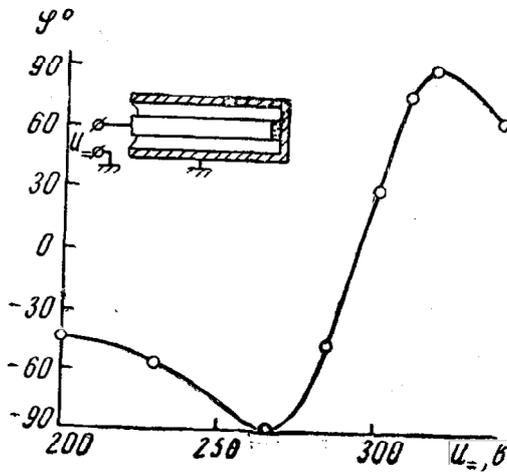


Рис. 4. Зависимость фазы коэффициента отражения от напряжения смещения на сегнетоэлектрическом резонаторе из титаната стронция. Рабочая температура  $77^{\circ}\text{K}$

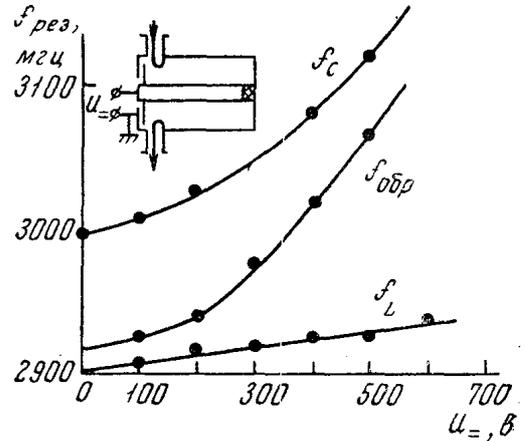


Рис. 5. Зависимость собственных частот ( $f_c$  и  $f_L$ ) коаксильного резонатора от напряжения смещения на сегнетоэлектрическом резонаторе из титаната стронция, помещенном в разрыв центрального проводника, и зависимость от напряжения смещения собственной частоты  $f_{обр}$  сегнетоэлектрического резонатора. Рабочая температура  $77^{\circ}\text{K}$

весьма высокая управляемость собственной частотой. Для нелинейного элемента из титаната стронция в диапазоне  $10\text{ см}$  получена крутизна перестройки частоты, равная  $680\text{ кгц/в}$ . Если вместо распределенного нелинейного элемента применить сосредоточенный конденсатор из того же материала, имеющий ту же входную реактивную проводимость, что и распределенный элемент, то получится крутизна перестройки, равная  $20\text{ кгц/в}$ . Выигрыш в управляемости связан со специфической резонансной зависимостью входного реактивного сопротивления распределенного элемента.

Распределенный элемент вносит в резонатор относительно большие потери, большие, чем потери, вносимые сосредоточенным конденсатором с теми же входными реактивными параметрами. Снижение нагруженной добротности совокупной системы, однако, укладывается во вполне допустимые рамки. Так для коаксиального резонатора, рассчитанного на частоту  $3000\text{ мгц}$ , с распределенным нелинейным элементом из титаната стронция получена нагруженная добротность порядка 150. Высокая управляемость собственной частоты резонатора с нелинейным элементом распределенного типа может быть положена в основу работы параметрического усилителя типа модулятор—демодулятор. Видеоусилитель подобного типа на нелинейном распределенном элементе из титаната стронция, работающем с охлаждением до азотной температуры, показал следующие результаты. На частоте сигнала  $100\text{ кгц}$  при частоте накачки  $3000\text{ мгц}$  получен коэффициент усиления по мощности, равный 300. Полоса усиливаемых частот усилителя простирается от нуля до частот, для которых начинает сказываться электрическая протяжен-

ность элемента. Это означает, что верхняя граница полосы лежит в области частот, примерно на порядок величины более низких, чем частота накачки усилителя. Следует учитывать, что усилитель типа модулятор—демодулятор на сегнетоэлектрическом распределенном нелинейном элементе обладает существенным недостатком. Усиливаемый сигнал подается на элемент, обладающий большой статической емкостью. Это, по-видимому, может наложить определенные ограничения на круг возможных применений видеоусилителей подобного типа.

Применение сегнетоэлектриков в системах СВЧ диапазона ограничивается в настоящее время относительно высокими диэлектрическими потерями сегнетоэлектрических материалов. В связи с этим обстоятельством все описанные в литературе системы работают при температурах, лежащих несколько выше температуры Кюри применяемых сегнетоэлектриков. Выше точки Кюри, если температура не слишком удалена от точки фазового перехода, нелинейность остается еще достаточно высокой, а потери резко падают по сравнению с потерями в сегнетоэлектрической фазе. В окрестности перехода, однако, сегнетоэлектрические материалы обладают резкой зависимостью всех свойств от температуры. В связи с этим проблема термостатирования нелинейных элементов приобретает первостепенное значение. Применение нелинейных элементов распределенного типа дает существенные преимущества и в этом смысле. В силу температурной зависимости диэлектрической проницаемости от температуры зависит и резонансная частота сегнетоэлектрического резонатора. Расчет показывает [5], что при соответствующем выборе параметров системы тепловая расстройка резонансной частоты распределенного нелинейного элемента может привести к автоматическому регулированию тепла, выделяемого в его объеме, и к автоматической стабилизации его температуры.

Таким образом, результаты расчетов и экспериментов, приведенные в настоящей работе, показывают, что использование сегнетоэлектрических резонаторов в качестве нелинейных элементов СВЧ позволяет реализовать ряд полезных эффектов и является одним из перспективных путей практического применения нелинейных диэлектриков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов И. В., Морозов Н. А. «Радиоэлектроника», 11, 3, 288, 1968.
2. Мироненко И. Г. Реферат канд. диссертации. ЛЭТИ им. В. И. Ульянова-Ленина, 1968.
3. Иванов И. В. «Вопросы радиоэлектроники», сер. III, 3, 85, 2965.
4. Иванов И. В., Петров В. М. «Изв. АН СССР», сер. физич., 22, 1524, 1958.
5. Иванов И. В. «Радиотехника и электроника», 13, 7, 1968.

Поступила в редакцию  
27.12.1968 г.

Кафедра  
физики колебаний