

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.375.9

И. В. ИВАНОВ, И. М. АНГЕЛОВ, И. М. БУЗИН, Е. И. РУКИН

ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМАЯ РАБОЧАЯ МОЩНОСТЬ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ РЕЗОНАНСНОГО ТИПА

Многие сегнетоэлектрические устройства сверхвысокочастотного диапазона, такие, как параметрические усилители, переключатели, фазовращатели и т. д., являются устройствами резонансного типа с колебательными контурами. Резонансные элементы этих устройств представляют собой полые резонаторы СВЧ с сосредоточенными сегнетоэлектрическими конденсаторами, сегнетоэлектрические резонаторы различных типов или иные колебательные системы смешанного типа. Во всех случаях чувствительность диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков к изменению температуры приводит к температурной чувствительности собственных частот всех перечисленных систем. При определенной мощности генератора, возбуждающего рассматриваемую систему, тепло диэлектрических потерь, выделяющееся в объеме сегнетоэлектрического нелинейного элемента, может привести к такому повышению температуры сегнетоэлектрика, что система утратит стабильность. При этом некоторые значения расстройки системы относительно частоты возбуждающего генератора окажутся запрещенными.

Рассмотрим в качестве примера диэлектрический резонатор, изготовленный из сегнетоэлектрического материала. Как известно, мощность потерь, выделяющихся в объеме диэлектрического резонатора (ДР), зависит от температуры следующим образом [1]:

$$P_{\Pi} = \frac{4\beta P_0}{(1 + \beta)^2 + \xi^2(T)}, \quad (1)$$

где P_0 — мощность падающей волны, β — коэффициент связи ДР с внешней цепью, $\xi = 2Q_0\Delta\omega/\omega_0$ — обобщенная расстройка, Q_0 — собственная добротность резонатора. Поглощение этой мощности приводит к неоднородному нагреванию объема ДР. В результате при работе системы расстройка резонатора оказывается отличной от исходной и зависит от величины поглощаемой СВЧ мощности. Поскольку в конечном итоге значение расстройки определяется стационарным распределением температуры в объеме резонатора, данному распределению может быть поставлена в соответствие некоторая эффективная температура. По смыслу выражения (1) температура, определяющая расстройку $\xi(T)$, суть эффективная температура T_e .

Для определения стационарного теплового режима резонатора следует рассмотреть связь эффективной температуры с распределением температуры в его объеме. В случае резонаторов ТЕМ-типа, образованных отрезками соответствующих двухэлектродных линий с сегнетоэлектрическим заполнением, можно считать, что один из электродов ДР находится при фиксированной температуре T_0 (температура термостата) и что основной поток тепла из объема резонатора идет именно к этому электроду. При этом температура второго электрода и прилегающего к нему слоя диэлектрика получается максимальной (T_{\max}). Для плоских систем ТЕМ-типа, например радиального или микрополоскового резонаторов, эффективная температура T_e есть [2]

$$T_e = T_0 + \frac{P_{\Pi}}{3\kappa v} d^2, \quad (2)$$

где κ — коэффициент теплопроводности сегнетозлектрика, v — объем резонатора, d — его высота. Формально весь тепловой поток из объема резонатора, равный энергии потерь в единицу времени, можно свести к некоторому эффективному потоку тепла от изотермической поверхности с температурой T_e к заземленной плоскости с температурой T_0 .

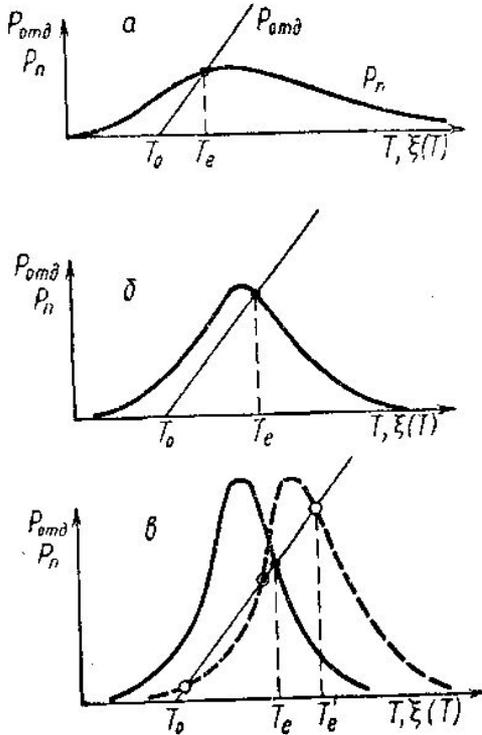


Рис. 1. Температурные зависимости мощности диэлектрических потерь сегнетозлектрического резонатора P_{Π} и мощности теплоотдачи $P_{отд}$ при различных уровнях мощности генератора СВЧ: а — мощность генератора P_0 ниже порогового уровня

P_0^{\max} , б — $P_0 = P_0^{\max}$, в — $P_0 > P_0^{\max}$

●, ○ — устойчивые состояния равновесия, ⊙ — неустойчивые состояния равновесия

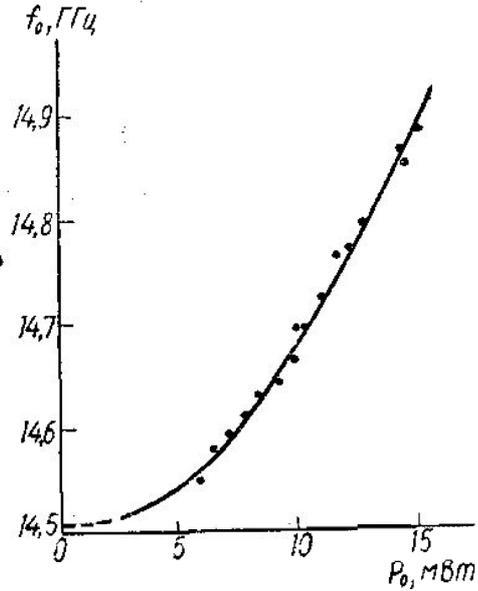


Рис. 2. Зависимость собственной частоты радиального резонатора из сегнетокерамики ВК-7 от мощности СВЧ-генератора

Таким образом, для мощности теплоотдачи можно записать следующее:

$$P_{отд} = \frac{T_{\max} - T_0}{R_T} = \frac{T_e - T_0}{R_{Te}}, \quad (3)$$

где R_T — общее тепловое сопротивление ДР вдоль направления теплотока, R_{Te} — тепловое сопротивление между плоскостью, имеющей температуру, равную эффективным и холодным электродам.

Тепловое равновесие установится, когда мощность потерь окажется равной мощности теплоотдачи с поверхности резонатора:

$$P_{\Pi} = P_{отд}, \quad (4)$$

Соотношение (4) позволяет графически проиллюстрировать поведение системы. На рис. 1 прямые линии характеризуют возможные значения мощности теплоотдачи для данного теплового сопротивления R_{Te} . Точки пересечения прямых теплоотдачи и

кривых мощности диэлектрических потерь, выделяющейся в ДР, соответствуют стационарному состоянию системы с некоторой эффективной температурой T_e . При изменении частоты генератора или напряжения смещения, подаваемого на резонатор, кривые диэлектрических потерь перемещаются в горизонтальном направлении. При этом, если мощность P_0 лежит ниже некоторого допустимого уровня P_0^{\max} (рис. 1,а), могут быть реализованы любые заданные значения расстройки. Если же мощность P_0 превосходит допустимый предел (рис. 1,б), значения расстройки, лежащие на пересечении прямой теплоотдачи с левым склоном кривой диэлектрических потерь, запрещены, так как они соответствуют неустойчивому тепловому равновесию. Граничное значение мощности P_0^{\max} , разделяющее два описанных режима, может быть получено, если приравнять максимальную крутизну левого склона кривой диэлектрических потерь крутизне прямой теплоотдачи (рис. 1,б):

$$\max \left(\frac{dP_{\Pi}}{dT_e} \right)_{\xi < 0} = \left(\frac{dP_{\text{отд}}}{dT_e} \right) = \frac{1}{R_{\text{те}}} \quad (5)$$

Выполнив дифференцирование, легко получить

$$P_0^{\max} = \frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{(1+\beta)^3}{\beta} \cdot \frac{(T - T_k)}{Q_0} \cdot \frac{1}{R_{\text{те}}} \quad (6)$$

здесь T_k — температура Кюри—Вейсса используемого сегнетоэлектрического материала, T — рабочая температура резонатора.

Из соотношений (5) и (6) следует, что для повышения уровня рабочей мощности необходимо выбирать конфигурации сегнетоэлектрических элементов, обладающих возможно меньшим тепловым сопротивлением. При этом прямые теплоотдачи на рис. 1 пройдут более круто и точки, соответствующие неустойчивому тепловому равновесию системы, появятся при более высоких значениях мощности P_0 . Оценка и правильный выбор тепловых параметров сегнетоэлектрических нелинейных элементов особенно важны, когда эти элементы используются в параметрических усилителях СВЧ диапазона, поскольку получение заданного коэффициента усиления, требующее определенного уровня мощности накачки, может оказаться в противоречии с тепловой стабильностью системы.

В качестве примера приведем данные для сегнетоэлектрических резонаторов радиального типа [3]. Радиальный резонатор представляет собой цилиндрический образец, несущий на торцевых плоскостях металлические электроды. Тепловое сопротивление резонатора подобного типа равно

$$R_{\text{те}} \simeq \frac{0,4d}{\kappa S} \quad (7)$$

где d — высота резонатора, S — площадь его электродов, один из которых имеет температуру термостата T_0 ; κ — коэффициент теплопроводности материала ДР.

Экспериментальная зависимость собственной частоты резонатора радиального типа, возбужденного на типе колебаний E_{010} , диаметром 0,5 мм и высотой 0,4 мм, изготовленного из сегнетокерамики ВК-7 ($T_k \simeq -10^\circ \text{C}$, $\kappa \simeq 2,4 \cdot 10^{-2}$ Вт/см·град), показана на рис. 2. На рабочей частоте порядка 14,5 ГГц при комнатной температуре нагруженная добротность резонатора составляла $Q_{\Pi} = (1+\beta)Q_0 \simeq 10$, $\beta \simeq 0,3$. Оценки по формулам (6) и (7) показывают, что для такого резонатора предельно допустимая величина мощности СВЧ, при которой еще возможно реализовать любые расстройки, составляет $P_0^{\max} \simeq 20$ мВт. Экспериментально факт приближения P_0 к предельно допустимому значению проявляется в резкой зависимости собственной частоты резонатора от величины P_0 . Ограниченная выходная мощность клистронного генератора ГС-627, примененного в данном эксперименте, не позволила подойти к величине P_0^{\max} еще ближе.

При работе с микрополосковым резонатором, выполненным из сегнетокерамики ВК-7, используемым в качестве нелинейного элемента параметрического усилителя диапазона 1 ГГц [4], также наблюдалось вначале монотонное, а затем скачкообразное изменение собственной частоты резонатора. При мощности генератора накачки, превышающей 1,1 Вт, происходил скачок в устойчивое тепловое состояние, соответствующее автотермостабилизации резонатора [1] (система перескакивала из точки 2 в точку 3 (рис. 1,б)). Оценки, выполненные на основе соотношений, аналогичных (6) и (7), дают для микрополоскового резонатора из ВК-7 значения величины P_0^{\max} , близкие к наблюдавшимся экспериментально. Эти значения мощности накачки превосходят уровень $P_0^{\text{порог}}$, который требуется для регенерации потерь нелинейного эле-

мента параметрического усилителя. Если микрополосковый резонатор изготовить из моно- или поликристаллического титаната стронция, значение мощности P_0^{\max} оказывается существенно больше величины $P_0^{\text{порог}}$ [5, 6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов И. В. «Радиотехника и электроника», 13, 1291, 1968.
2. Иванов И. В., Карягин С. Н., Семенова Т. Г. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., 11, 298, 1971.
3. Иванов И. В., Гонсалес О. Х. и др. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 1, 40, 1969.
4. Ангелов И. М., Иванов И. В., Лаптев А. Г. «Изв. вузов», радиоэлектроника, 16, 28, 1973.
5. Иванов И. В. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., 14, 501, 1973.
6. Ангелов И. М. Реферат канд. диссертации. МГУ, 1973.

Поступила в редакцию
15.5 1973 г.

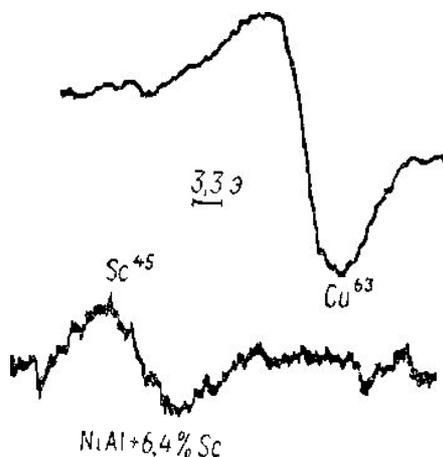
Кафедра
физики колебаний

УДК 669.71 : 559.143.43

Л. Ф. МАРТЫНОВА, В. И. ЧЕЧЕРНИКОВ, В. И. НЕДЕЛЬКО

СДВИГ НАЙТА НА ЯДРАХ Sc^{45} и Al^{27} В СЛАБОМАГНИТНОЙ МАТРИЦЕ NiAl

Как показано в работе [1], сдвиг Найта в скандии — металле с гексагональной решеткой — в основном определяется положительным вкладом, обусловленным эффектами смешивания s и d волновых функций, при этом величина вклада за счет контактного взаимодействия очень мала ($\sim 0,04\%$). В связи с этим представляет интерес оценить величину контактного вклада в случае, когда эффекты $s-d$ смешивания незначительны. Для этой цели нами был взят сплав NiAl+6% Sc, обладающий кристаллической структурой типа CsCl. Образец готовился методом дуговой плавки. Микроструктурный и рентгеноструктурный анализы показали, что полученный образец является однофазным. На сплаве NiAl+6% Sc, в интервале температур 78—300° К измерены сдвиги Найта на ядрах скандия и алюминия и магнитная восприимчивость.



Для записи спектров поглощения ядер Sc^{45} и Al^{27} использовали спектрометр ЯМР для шихли и, при этом сдвиги Найта Sc^{45} и Al^{27} в исследуемом образце измеряли относительно резонанса ядер Cu^{63} в металлической меди.

Экспериментальный спектр приведен на рисунке. Оказалось, что величина сдвига Найта на ядрах Sc^{45} в сплаве NiAl+6% Sc имеет значение $0,14 \pm 0,01\%$, а на ядрах $Al^{27} \approx 0,05\%$. Ошибка измерений при определении сдвига не превышает 0,01%.

Магнитную восприимчивость сплава NiAl+6% Sc измеряли методом Фарадея, с помощью маятниковых весов, с точностью до 5%. В исследуемой области температур изучаемый сплав является температурнонезависимым парамагнетиком, при этом величина магнитной восприимчивости составляет $20 \cdot 10^{-6}$ СГСМ/моль.

Известно [2], что упорядоченный сплав NiAl также представляет слабый температурнонезависимый парамагнетик, электронная структура которого хорошо описывается в рамках простой двухзонной модели и значение сдвига Найта Al^{27} (0,05%) в сплаве NiAl, равное сдвигу в сплаве NiAl+6% Sc, обусловлено эффектами экранировки избыточного заряда на ядрах алюминия d -электронами никеля [3].

Из постоянства сдвигов Найта Al^{27} в NiAl и в изучаемом сплаве следует, что механизм создания сдвига Найта Al^{27} в сплаве NiAl+6% Sc, по-видимому, такой же, как и в чистом NiAl. Атомы скандия в сплаве NiAl+6% Sc замещают атомы никеля