УДК 537.226.33:538.589.3

В. М. СЫЧЕВ, Г. В. БЕЛОКОПЫТОВ, И. В. ИВАНОВ

НЕЛИНЕЙНЫЕ ПОТЕРИ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ ИЗ ТИТАНАТА СТРОНЦИЯ ПРИ Т=4,2 К

В последнее время была показана перспективность диэлектрических резонаторов из титаната стронция как нелинейных элементов параметрических систем [1, 2]. Одной из основных характеристик диэлектрических резонаторов является уровень потерь. В связи с этим нами были измерены добротности резонаторов из титаната стронция на частотах 0,5—1 ГГц при температуре жидкого гелия.

Диэлектрические резонаторы представляли собой прямоугольные бруски, вырезанные из монокристаллов $SrTiO_3$, и имели размеры приблизительно $1\times3\times10$ мм^3. Возбуждение резонаторов в измерительной ячейке производилось, как правило, на основном магнитном типе ($H_{11\delta}$). Измерительная ячейка была выполнена в виде цилиндрической полости, связанной с двумя отрезками коаксиального кабеля. Диэлектрический резонатор, закрепленный с помощью шелковой нити на конце керамического стержня, вводился в измерительную ячейку и размещался внутри петли, соединявшей центральные проводники коаксиальных кабелей. Таким образом, ячейка с диэлектрическим резонатором представляла собой неоднородность в тракте.

Во время измерений ячейка с образцом помещалась в транспортный сосуд Дьюара СТГ-25. Определение добротности проводилось по зависимости проходящей мощности от частоты [3], получаемой на экране измерителя частотных характеристик XI-19A. Во всем диапазоне изменения мощности, поглощаемой в резонаторе (до 1 мВт), уходов собственной частоты, соответствующих нагреву диэлектрического резонатора, отмечено не было.

В эксперименте была обнаружена зависимость собственной добротности Q_0 резонаторов от мощности СВЧ-сигнала. Типичные результаты приведены на рис. 1. Полагая $\operatorname{tg}\delta_{эфф}=1/Q_0$, можно представить полученную зависимость в виде

$$\operatorname{tg}\delta_{эфф}=\operatorname{tg}\delta_0+A\sqrt{P},$$

где P (мВт) — мощность, поглощаемая в резонаторе, $\operatorname{tg}\delta_0$ имеет величину $(0{,}85—1{,}0)\times10^{-3}$, $A=(0{,}5—0{,}7)\times10^{-3}$ (мВт)$^{-1/2}$ (рис. 2).

На малых уровнях мощности ($P<1$ мкВт) потери соответствовали величине $\operatorname{tg}\delta_{эфф}=(0{,}85—1{,}0)\times10^{-3}$. Таким образом, минимальный уровень потерь в данном эксперименте имел тот же порядок, что и в [4] ($f=8—11$ ГГц, $\operatorname{tg}\delta=2\cdot10^{-3}$) и [5] ($f=1{,}8—2{,}5$ ГГц, $\operatorname{tg}\delta=1\cdot10^{-3}$). При этом значения добротности резонаторов, полученные нами на разных частотах ($f=0{,}5—1$ ГГц), различались не более чем на 40%.

С увеличением поглощаемой в резонаторе мощности $\operatorname{tg}\delta$ заметно растет, и при $P\sim1$ мВт добротность резонаторов уменьшается практически вдвое. Принятые меры контроля и предосторожности (проверка квадратичности детектора, контрольные измерения на металлическом полом резонаторе, варьирование конструкции измерительной ячейки и т. д.) позволяют утверждать, что зависимость $\operatorname{tg}\delta(P)$ связана лишь с нелинейным поглощением в диэлектрике. Обращает на себя внимание малая интенсивность измерительного СВЧ-поля, при которой наблю-

дается нелинейность потерь. Так, при $P=1$ мВт поле в резонаторе — порядка 1 В/см.

Нелинейные потери наблюдались также в диэлектрических резонаторах с электродами. На рис. 1 приведена зависимость $Q_0(P)$ для резонатора с электродами из ниобия (кривая *3*). Добротность резонаторов с электродами была существенно ниже, несмотря на то что нио-

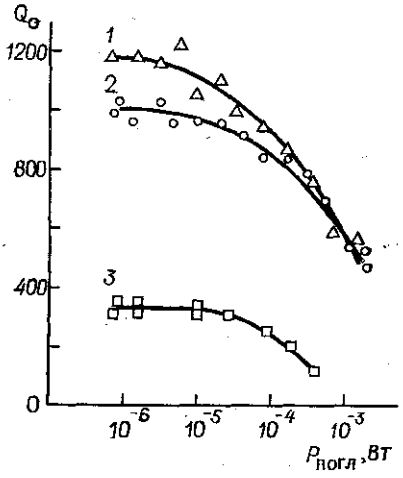

Рис. 1. Зависимость добротности диэлектрических резонаторов из $SrTiO_3$ от поглощаемой мощности: *1*, *2* — резонаторы без электродов, *3* — резонатор с электродами из ниобия

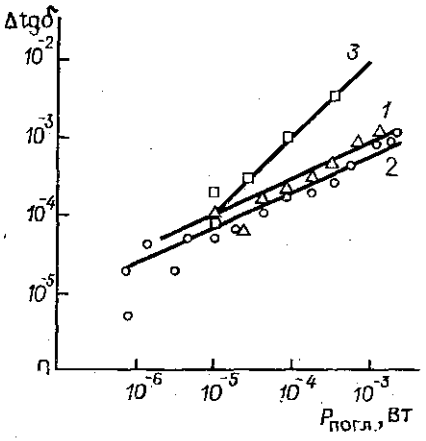

Рис. 2. К определению вида функциональной зависимости нелинейных потерь, $\Delta \operatorname{tg} \delta(P) = 1/Q_0(P\to 0) - 1/Q_0(P)$. Обозначения те же, что на рис. 1

бий находился в сверхпроводящем состоянии. Кроме того, в отличие от безэлектродного случая, потери в таких резонаторах зависели от мощности по закону

$$\operatorname{tg} \delta_{эфф} = \operatorname{tg} \delta_0 + BP,$$

где для зависимости *3* (рис. 1) $\operatorname{tg} \delta_0 = 2{,}9\cdot 10^{-3}$, $B = 0{,}012$ мВт$^{-1}$.

Кратко обсудим возможные причины наблюдавшихся нелинейных потерь. Известны механизмы нелинейных потерь в $SrTiO_3$, связанные с параметрическим преобразованием электромагнитной волны в акустические колебания. Однако эти потери характерны для гораздо большей напряженности электрических полей (порядка 10^3—10^4 В/см в поликристаллическом $SrTiO_3$ при $T=78$ К) [6, 7].

В [8] указано на возможность перехода малой части объема $SrTiO_3$ в сегнетоэлектрическое состояние. Диссипация электромагнитной энергии на сегнетоэлектрических доменах может явиться причиной нелинейных потерь. Однако такой механизм не объясняет различий в поведении добротности резонаторов с электродами и без них.

Наконец, в [9, 10] обнаружено, что в кристаллах титаната стронция имеется значительный объемный заряд, т. е. носители, локализованные на глубоко расположенных ловушечных уровнях. Релаксация объемного заряда может приводить к нелинейным потерям, причем различный уровень потерь в резонаторах с электродами и без них может быть обусловлен влиянием электродов на пространственный заряд [11]. Таким образом, последний механизм качественно согласуется с полученными экспериментальными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов И. В., Белокопытов Г. В., Сычев В. М. Параметрические взаимодействия в диэлектрических резонаторах СВЧ из титаната стронция при температуре жидкого гелия.— Письма в ЖТФ, 1977, 3, № 19, 1011.
2. Горин Ю. Н., Рубан А. С. Параметрический усилитель на монокристалле титаната стронция, работающий при температуре 4,2 К.— Радиотехника и электроника, 1978, 23, № 1, 225.
3. Тишер Ф. Техника измерений на СВЧ. М., 1963, с. 262.
4. Bethe K. Über das Mikrovellenverhalten nichtlinear Dielektika.— Philips Res. Rept., 1970. Suppl. 2, 81.
5. Агафонов Ю. А., Вендик О. Г. и др. Исследование диэлектрических свойств титаната стронция на СВЧ в интервале температур 2,5—78°К.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1975, 39, № 4, 841.
6. Вендик О. Г., Платонова Л. М., Соколов А. И. Параметрический механизм потерь в сегнетокерамике в сильных СВЧ-полях.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1969, 33, № 7, 1167.
7. Прудан А. М. Исследование электрических свойств поликристаллических пленок титаната стронция в сильных электрических полях СВЧ. Автореф. канд. дис. Л., 1977.
8. Yasunaga H. Photoconductive anomaly as an evidence of the local ferroelectric phase transition around 47°K in $SrTiO_3$— J. Phys. Soc. Japan, 1970, 28, Suppl., 454.
9. Цикин А. Н., Штурбина Н. А. Термостимулированная проводимость в монокристаллах $SrTiO_3$ — Физ. тв. тела, 1970, 12, № 11, 3353.
10. Лебедева Н. Н., Агаронов Б. С. и др. Фотолюминесценция, термолюминесценция и термостимулированная проводимость в монокристаллах $SrTiO_3$.— Физ. тв. тела, 1977, 19, № 12, 3684.
11. Höchli U. T. Field-induced space-charge layer in strontium titanate.— Ferroelectrics, 1974, 7, N 2, 237.

Поступила в редакцию
02.03.79

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1980, Т. 21, № 3

УДК 621.528.6

**Н. Н. КОНОНКОВА, Э. М. РЕЙХРУДЕЛЬ,
Г. В. СМИРНИЦКАЯ**

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ W-ПЛЕНОК, НАНЕСЕННЫХ РАСПЫЛЕНИЕМ В РАЗРЯДЕ С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Тонкие пленки тугоплавких металлов, в том числе W, находят все более широкое применение в микроэлектронике при производстве интегральных схем. Структура и свойства пленок зависят от распыляемого металла, температуры ($t_п$) и напряжения смещения ($V_{см}$) подложки, от состава остаточных газов и рабочего давления, от скорости напыления. В последние годы предпочтение отдается пленкам, полученным методам катодного распыления [1], в частности, в магнетронной системе [2]. В [3—5] рассматриваются электрические свойства и структура W-пленок, полученных испарением и распылением в высокочастотном диоде. Для получения тонких диэлектрических пленок авторы [6] использовали разряд с осциллирующими электронами.

В настоящей работе приводятся некоторые результаты исследования структуры и химического состава W-пленок, напыленных в разряде с осциллирующими электронами. Существование разряда при низком давлении и бомбардировка катодов ионами большой энергии создают определенные преимущества при использовании этого разряда для получения тонких пленок.