

Наблюдаемые особенности возбуждения страт должны, по-видимому, сохраняться и для других типов страт, а также при учете обратной связи через внешнюю цепь. В последнем случае можно будет объяснить наблюдаемое на опыте [1] смещение границы существования страт при изменении длины конической трубки с постоянными радиусами торцов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Маслова Л. И., Савченко И. А., Швилкин Б. Н. Физика плазмы, 1984, 10, с. 808. [2] Цендин Л. Д. ЖТФ, 1982, 52, с. 635. [3] Wojaszek K. Beitr. Plasmaphys., 1966, 6, N 5, p. 319. [4] Цендин Л. Д. ЖТФ, 1969, 39, с. 1341. [5] Ланда П. С., Мискинова Н. А., Пономарев Ю. В. УФН, 1980, 132, с. 601. [6] Найфэ А. Х. Методы возмущений. М.: Мир, 1976, с. 337. [7] Ланда П. С., Мискинова Н. А., Пономарев Ю. В. УФН, 1980, 132, с. 601. [6] Найфэ А. Х. Методы возмущений. М.: Мир, 1976, с. 337. [7] Ланда П. С. Автоколебания в распределенных системах. М.: Наука, 1983, с. 195. [8] Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Физическая кинетика. М.: Наука, 1979, с. 341.

Поступила в редакцию  
08.10.84

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1985, Т. 26, № 5

УДК 537.867:53.092

### ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА СВЧ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ ИЗ ТАНТАЛАТА КАЛИЯ

Г. В. Белокопытов, И. В. Иванов, Н. Е. Лебедев, А. А. Харин

(кафедра физики колебаний)

Виртуальный сегнетоэлектрик танталат калия при охлаждении вплоть до 0 К не переходит в сегнетофазу [1]. Однако эксперименты [2, 3] показали, что диэлектрические свойства  $\text{KTaO}_3$  существенно зависят от одноосного механического давления  $\sigma$ , причем при  $\sigma > 5,2 \cdot 10^9$  дин/см<sup>2</sup> наблюдался переход в сегнетофазу. Измерения зависимости  $\epsilon(\sigma)$  на частотах 1—100 кГц позволили найти коэффициенты электрострикции  $Q_{\mu}$ . Если в разложении свободной энергии стрикционный член представляется в виде  $-Q_{\mu\sigma\lambda}(PP)_{\mu}$ , то, в частности,  $Q_{12} = -(2,5-2,9) \cdot 10^{-13}$  СГС [2, 3].

Нами проведены СВЧ-измерения диэлектрической проницаемости и потерь  $\text{KTaO}_3$  методом диэлектрического резонатора (ДР) под давлением. Несмотря на усложнение техники эксперимента, эта методика имеет существенные достоинства. Она позволяет исключить систематические ошибки, связанные с нанесением электродов на кристаллы, и ослабить влияние поверхностного слоя на результаты измерений. Известно, что диэлектрические, упругие и электромеханические характеристики поверхностного слоя  $\text{KTaO}_3$  существенно отличаются от объемных, в частности в нем возникает пьезоэффект [4, 5], отсутствующий в однородной среде с центром инверсии. В связи с этим сопоставление результатов низкочастотных и СВЧ-измерений коэффициентов электрострикции весьма желательно. Одновременное измерение добротности ДР дает возможность изучать зависимость потерь от давления; эта информация полезна для выяснения механизмов диссипации энергии в сегнетоэлектриках.

Эксперимент проводился при  $T=4,2$  К на частотах 0,5—1,3 ГГц в специально созданной криогенной установке. В качестве ДР использовались цилиндрические образцы из монокристаллов  $\text{KTaO}_3$ , ось которых была ориентирована в кристаллографическом направлении [100]. Резонаторы помещались в коаксиальную измерительную ячейку, которая обеспечивала приложение к их торцам одноосного давления и возбуждение в них электромагнитных колебаний на низших  $H$ - и  $E$ -модах. Давление индуцировало диэлектрическую анизотропию, поэтому резонансные частоты на этих типах колебаний изменялись по разным законам. Электрическое поле основной осесимметричной моды  $H_{018}$  лежало в плоскости, перпендикулярной оси давления, поэтому резонансная частота моды  $f_H$  определялась лишь одной компонентой диэлектрической проницаемости  $f_H \sqrt{\epsilon_1} = \text{const}$ . В случае, когда давление приложено в кристаллографическом направлении [100], справедлива формула

$$4\pi\epsilon_1^{-1}(\sigma) = 4\pi\epsilon^{-1}(0) + 2Q_{12}\sigma \quad [3]. \quad (1)$$

Приложение возрастающего давления вплоть до  $3 \cdot 10^9$  дин/см<sup>2</sup> приводило к понижению  $f_H$  таким образом, что приближенно выполнялось соотношение, следующее из термодинамической теории:

$$f_H^2(\sigma)/f_H^2(0) = \epsilon(0)/\epsilon_L(\sigma) = |\sigma - \sigma_c|/\sigma_c, \quad (2)$$

где  $\sigma_c = -2\lambda/(\epsilon(0)Q_{12})$  (рис. 1, 1—4). В экспериментах с разными кристаллами, а

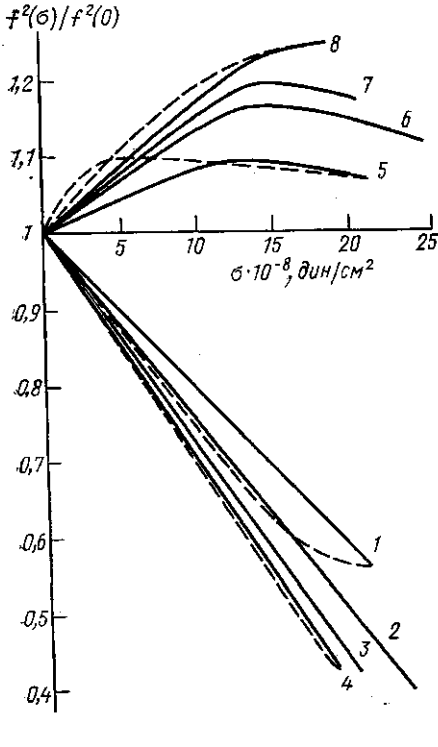


Рис. 1. Влияние нарастания (сплошные линии) и убывания (пунктир) одноосного давления на резонансные частоты основных *H*- и *E*-мод для цилиндрического ДР: 1—4 — последовательные циклы охлаждения для *H*-моды, 5—8 — соответствующие циклы для *E*-моды. Диаметр образца 3,5 мм, высота 3 мм,  $f_0 = 1182,5$  МГц

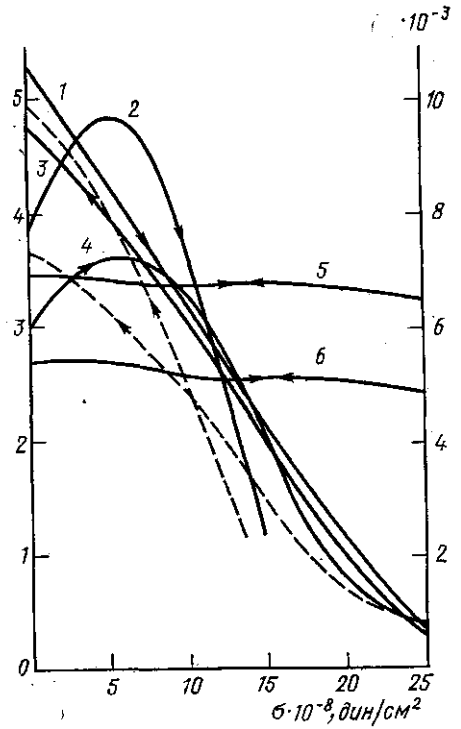


Рис. 2. Зависимость добротности ДР от приложения однородного и неоднородного давления. 1, 4, 6 — *H*-мода, 2, 3, 5 — *E*-мода; 5, 6 — однородное давление, 1—4 — неоднородное (2, 4 — со слюдяными прокладками в виде диска диаметром 2,5 мм; 1, 3 — со слюдяными прокладками в виде шайбы с внешним диаметром 5 мм и внутренним 2,3 мм). Диаметр образца 4,25 мм

также и на одних и тех же образцах, но в разных циклах охлаждения значения  $\sigma_c$  варьировались в пределах  $(3,8—7,5) \cdot 10^9$  дин/см<sup>2</sup>. Соответственно значения  $Q_{12}$  составляли  $(-2,0; -4,9) \cdot 10^{13}$  СГС, что находится в разумном согласии с результатами [2, 3].

Воспроизводимость значений  $\epsilon(0)$  и  $\sigma_c$  в эксперименте была значительно ниже, чем следовало ожидать, исходя из возможности методики. (Погрешность определения  $\epsilon$  по формулам для диэлектрического резонатора [6] была порядка 2%.) Однако при гелиевых температурах кристаллическая решетка  $\text{KTaO}_3$  весьма податлива к действию электрических полей сравнительно малой интенсивности [7], поэтому поле, хаотически распределенное в решетке, может заметным образом влиять на диэлектрическую проницаемость  $\text{KTaO}_3$ . В настоящей работе  $\epsilon(0)$  составляла у различных образцов от 4200 до 4900. По всей видимости, расхождение в  $\epsilon$  было следствием различия в концентрации заряженных дефектов в булях, из которых изготавливались образцы. На существование подобных вариаций указывают различия в величинах хаотических электрических полей — полей размытия [7, 8].

Характерной особенностью зависимости  $\epsilon_L(\sigma)$  является ее гистерезисный вид (см. рис. 1). Эксперименты с прокладками из различных материалов показали, что

гистерезис не связан с сухим трением. В пользу этого свидетельствует и тот факт, что при снятии давления резонансные частоты возвращались к первоначальным значениям.

Зависимость  $f(\sigma)$  для основной  $E$ -моды немонотонна (см. рис. 1). Это связано с тем, что она является гибридной ( $EH_{116}$  или  $EH_{106}$ ), и ее электрическое поле имеет составляющие как вдоль, так и перпендикулярно оси давления. Соответствующие же компоненты диэлектрической проницаемости зависят от  $\sigma$  противоположным образом:  $\epsilon_{||}$  уменьшается, а  $\epsilon_{\perp}$  растет [3].

Зависимость уровня диэлектрических потерь от давления показана на рис. 2. При однородном давлении потери практически не изменились. Однако если с помощью скользящих прокладок к образцам прикладывалось неоднородное давление, то добротности  $H$ - и  $E$ -мод падали. В эксперименте применялись прокладки двух типов. Прокладки в виде диска создавали повышенную концентрацию напряжений в центральной части образца, а прокладки в виде шайбы — в периферической части ДР.

При гелиевых температурах фундаментальный механизм диссипации, обусловленный ангармонизмом решетки  $KTaO_3$ , дает исключительно малый вклад в СВЧ-потери (по оценкам [9]  $\text{tg } \delta \sim 10^{-8}$  при 4,2 К). В этих условиях основным источником потерь следует считать рассеяние на заряженных дефектах (точечных и линейных). По-видимому, на результаты настоящей работы особое влияние оказывало поведение линейных заряженных дефектов — дислокаций. Приложение неравномерного давления с максимумом на оси ДР сначала вызывает уменьшение их числа за счет вытеснения к краю цилиндра, а затем увеличение за счет рождения на закрепленных дислокациях [10], что ведет к отмеченному в эксперименте изменению потерь.

При неоднородном давлении возможен переход части образца в сегнетофазу (в области максимальной концентрации напряжений). Это также должно вести к росту потерь. Но так как давление индуцирует в  $KTaO_3$  фазовый переход II рода [3], то сам по себе переход в сегнетофазу под давлением не должен вести к гистерезису в зависимостях  $\epsilon(\sigma)$  и  $\text{tg } \delta(\sigma)$ . Такой гистерезис может породить взаимодействие дислокаций с заряженными точечными дефектами, на которое фазовый переход, индуцированный давлением, может оказать косвенное влияние. Механизм этого явления требует дальнейшего исследования, но уже полученные результаты показывают, что высокая концентрация дефектов в кристаллах  $KTaO_3$  заметно влияет на их диэлектрические свойства и может быть фактором, лимитирующим уровень СВЧ-потерь в этом перспективном нелинейном диэлектрике.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. М.: Мир, 1981. [2] Uwe H., Unoki H., Fujii Y., Sakudo T. Solid State Comm., 1973, 13, N 7, p. 737. [3] Uwe H., Sakudo T. J. Phys. Soc. Japan, 1975, 38, N 1, p. 183. [4] H6chli U. T., Boatner L. A. J. Phys. C.: Solid State Phys., 1977, 10, N 21, p. 4319. [5] Holt R. M., Fossheim K., Raean A. M. Appl. Phys. Lett., 1978, 32, N 10, p. 601. [6] Yee H. Y. IEEE Trans. MTT, 1965, 14, N 9, p. 439. [7] Ivanov I. V. et al. Ferroelectrics, 1978, 21, N 3/4, p. 405. [8] Гейфман И. Н. ФТТ, 1982, 24, с. 329. [9] Таганцев А. К. ЖЭТФ, 1984, 86, с. 2215. [10] Шаскольская М. П. Кристаллография. М.: Высш. школа, 1984.

Поступила в редакцию  
18.03.85

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1985, Т. 26, № 5

УДК 621.373.51

## МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР В ТРЕХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ

И. И. Миннакова, Б. Г. Симеонова (Болгария)

(кафедра физики колебаний)

В современном физическом эксперименте и в технике широко используются электромагнитные сверхпроводящие резонаторы (СПР) [1], а в последнее время СПР с диэлектрическим заполнением [2] и чисто диэлектрические (кольцевые и дисковые) резонаторы [3, 4]. В качестве высокодобротных элементов в трехконтурной системе стабилизации частоты уже при комнатной температуре может служить металлодиэлектрический резонатор (МДР), обладающий добротными модами и дающий