

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров В.Е., Островский Л.А., Соустова И.А., Сутин А.М. Исследование аномальной акустической нелинейности в металлах // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 3. С. 491–499.
2. Островский Л.А. К нелинейной акустике слабосжимаемых пористых сред // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 5. С. 908–913.
3. Островский Л.А. Нелинейные свойства упругой среды с цилиндрическими полостями // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 3. С. 490–494.

Институт прикладной физики
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
22.01.91

УДК 534.8

© 1991 г.

Б.Ф. Борисов, В.В. Воробьев, А.А. Жилин, А.А. Кулешов,
В.М. Сарнацкий, Т.И. Чуваева

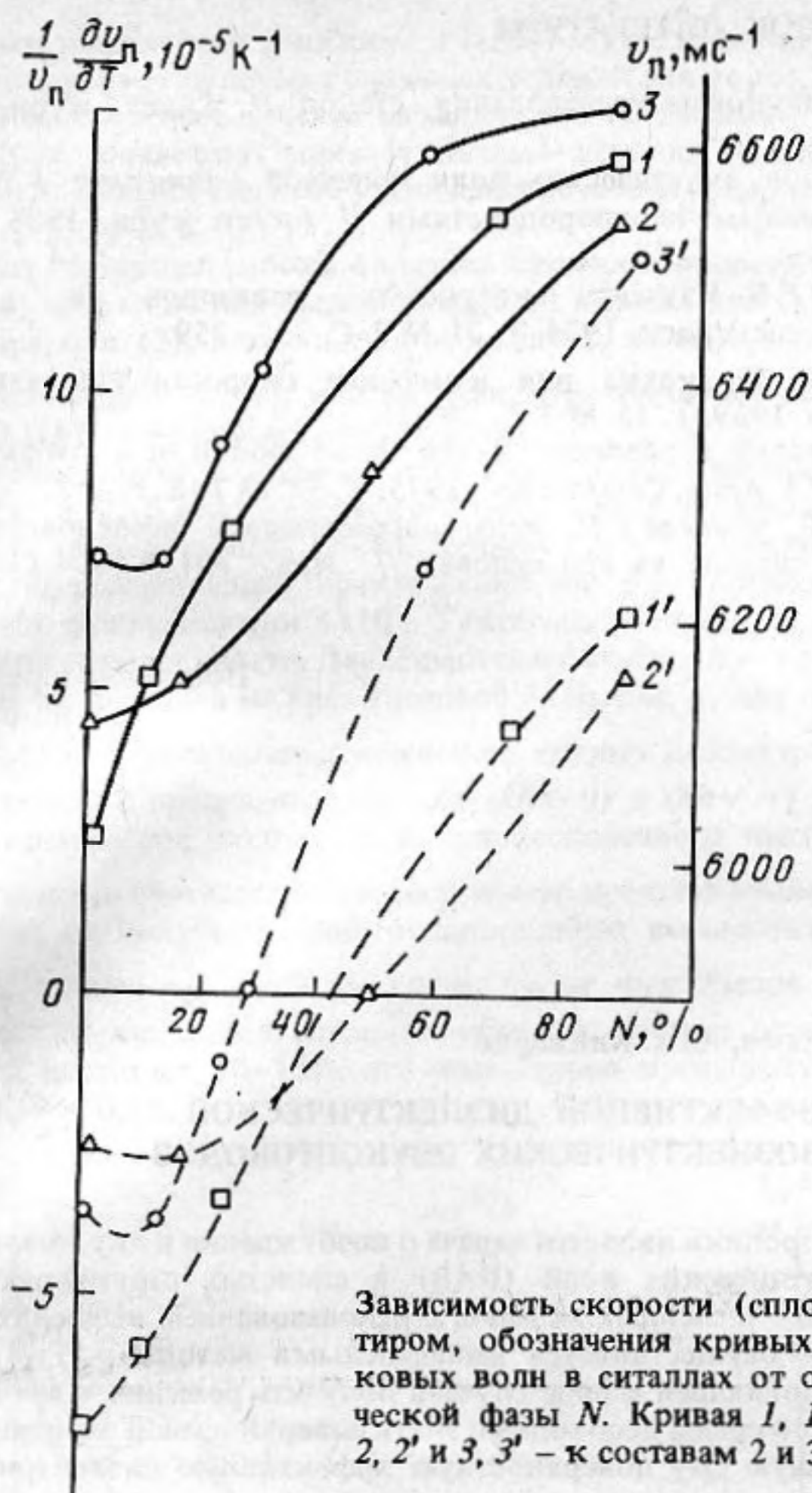
АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИТАЛЛОВ ЛИТИЕВОАЛЮМОСИЛИКАТНОЙ СИСТЕМЫ

Ситаллы (стеклокристаллические материалы) являются композиционной системой, состоящей из стеклофазы и микрокристаллов. Свойства ситаллов в значительной мере определяются относительным содержанием этих двух фаз, которое сравнительно просто варьируется путем применения соответствующих температурно-временных выдержек исходного стекла. Так как размеры кристаллов в оптически прозрачных ситаллах составляют 200–300 Å и упругие характеристики стеклофазы и кристаллов значительно различаются, ситаллы могут быть хорошим модельным объектом для изучения влияния мелкомасштабных микронеоднородностей (по сравнению с длиной волны ультразвука) на акустические свойства [1, 2].

В данной работе приводятся результаты измерений акустических характеристик (скорости v , температурного коэффициента скорости – ТКС и коэффициента затухания α ультразвуковых волн различной поляризации) в литиевоалюмосиликатных стеклах и в продуктах их термообработки – ситаллах трех марок по мере возрастания в них содержания кристаллической фазы. Исследовались два литиевоалюмосиликатных стекла составов № 1, 2 несколько различающихся относительным содержанием основных компонент, а также стекло состава № 3, в которое дополнительно введен оксид фосфора. При термообработке данных стекол в интервале температур 700–800 °С выделяются гексагональные кристаллы твердых растворов, изоструктурные β -кварцу и β -эвкрипиту [3]. Относительная степень закристаллизованности N термообработанных образцов оценивалась по значениям плотности, измеренной относительно образцов ситалла, в котором при длительном прогреве при температуре 800 °С сохранялось постоянное содержание кристаллической фазы.

Скорость продольных v_{\parallel} и сдвиговых v_{\perp} волн и ТКС измерялись на частоте 10 МГц импульсно-фазовым методом [4] с чувствительностью к относительным изменениям скорости ультразвука 10^{-4} . Область изменения температуры при измерениях ТКС составляла $-30 \div +50$ °С. Затухание α измерялось в диапазоне частот 100–500 МГц методом брэгговской дифракции света на ультразвуке. На рисунке для иллюстрации показано поведение скорости и ТКС продольных ультразвуковых волн в ситаллах в зависимости от величины N . Увеличение степени закристаллизованности ситаллов сопровождается: монотонным ростом скорости продольных и сдвиговых волн; изменением знака ТКС продольных волн с отрицательного на положительный с прохождением через нулевое значение ТКС; сохранением отрицательного знака ТКС для сдвиговых волн во всем диапазоне изменения величины N .

Необычные термоупругие свойства ситаллов, и в частности положительный знак ТКС для продольной волны, можно объяснить на основе простой модели, рассматривающей ситаллы, состоящими из стеклофазы и микронеоднородностей, размеры которых много меньше длины волны ультразвука. Наличие микрокристаллов с иным коэффициентом термического расширения, чем у остаточной стеклофазы, должно приводить к возникновению локальных микронапряжений на границе раздела фаз, и эффективный модуль упругости такой среды состоит из трех частей – соответствующих модулей для однородных фаз двухфазной системы и слагаемого, связанного с локальными напряжениями. При увеличении температуры материала поведение скорости звука зависит от относительного вклада двух процессов – обычного спада, присущего изотропной среде, и роста скорости из-за уменьшения локальных напряжений на границе раздела двух фаз в связи с аномальной зависимостью



Зависимость скорости (сплошные кривые) и ТКС (кривые пунктиром, обозначения кривых со штрихом) продольных ультразвуковых волн в ситаллах от относительного содержания кристаллической фазы N . Кривая 1, 1' относится к составу № 1, а кривые 2, 2' и 3, 3' — к составам 2 и 3 соответственно

модулей упругости литиевоалюмосиликатных ситаллов от статического давления [5]. В свою очередь, уменьшение локальных напряжений при повышении температуры может быть связано с уменьшением различий в величинах коэффициентов термического расширения микрокристаллов β — эвкриптитового твердого раствора и остаточной стеклофазы, обнаруженное для исследуемых ситаллов методами терморентгенографии [6]. При определенных значениях N процесс возрастания скорости звука из-за уменьшения локальных напряжений начинает доминировать над обычным температурным уменьшением ее в изотропной среде, что и приводит к положительному знаку ТКС для продольной волны. Как следует из работы [5], аномалии в поведении модуля сдвига при приложении статического давления существенно меньше по сравнению с аналогичной зависимостью модуля сжатия, что объясняет неизменность знака ТКС для сдвиговой волны.

Измерения коэффициента затухания α на высоких частотах, проведенные с целью определения размеров микронеоднородностей в ситаллах, показали пропорциональность α частоте ультразвука в исследованном диапазоне частот и нелинейную зависимость дополнительного затухания, обусловленного появлением кристаллической фазы, от величины N . Последний факт, а также нелинейная зависимость рэлеевского рассеяния света от N подтверждают сделанный выше вывод о значительном влиянии пограничных областей между стеклофазой и микрокристаллами на термоупругие свойства ситаллов.

Отметим в заключение возможные практически применения ситаллов в качестве звукопроводов в ультразвуковых линиях задержки (УЛЗ): различные знаки ТКС для продольных и сдвиговых волн позволяют сконструировать термокомпенсированную УЛЗ на основе преобразования типа волн; прохождение величины ТКС для продольной волны через нулевое значение при определенном значении N дает возможность получения УЛЗ с практически нулевым температурным коэффициентом времени задержки, так как ситаллы отличаются малым $\sim 10^{-7}$ град $^{-1}$ коэффициентом теплового расширения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кульбицкая М.Н., Шутилов В.А. Ультразвуковые исследования стекол // Акуст. журн. 1976. Т. 22. № 6. С. 793–811.
2. Чарная Е.В., Шутилов В.А. Распространение акустических волн конечной амплитуды в твердой среде с мелкомасштабными пространственными неоднородностями // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 1. С. 111–118.
3. Чуваева Т.И., Алексеева И.П., Полушко Е.В. Изучение β -кварцевых растворов в системе $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2$ // Журн. прикл. спектроск. 1974. Т. 21. № 2. С. 357–359.
4. Гитис М.Б., Михайлов И.Г., Шутилов В.А. Установка для измерения скорости ультразвука в образцах малых размеров // Акуст. журн. 1969. Т. 15. № 3. С. 28–35.
5. Kim K.Y., Roof A.L. Pressure and temperature dependence of the elastic moduli of a low-expansion lithium-aluminium silicate glass-ceramic // J. Amer. Ceramic Soc. 1975. V. 58. № 7–8. P. 352.
6. Астахова В.В., Жилин А.А., Филатов С.К., Чуваева Т.И. Рентгенографическое исследование термического расширения β -эвкриптита и ситалла на его основе // Изв. АН СССР. Сер. Неорган. матер. 1987. Т. 23. С. 841–845.

Научно-исследовательский институт
физики Ленинградского
государственного университета

Поступило в редакцию
01.10.90

УДК 621.315.6:537.226.86

© 1991 г.

В.А. Вьюн, С.М. Киккарин

О ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗВУКОПРОВОДОВ

Одной из важнейших задач акустоэлектроники является задача о возбуждении и акустоэлектронном взаимодействии поверхностных акустических волн (ПАВ) в слоистых структурах пьезоэлектрик – полупроводник. Кроме прямых численных методов с использованием вычислительных машин ее решение широко и плодотворно осуществляется импедансными методами [1–8], обладающими наглядностью и простотой, позволяющей в ряде случаев получить решения в аналитическом виде. При этом для пьезоэлектрической среды необходимо знать поверхностный электрический импеданс [1] или обратно пропорциональную ему поверхностную эффективную диэлектрическую проницаемость [2]:

$$\epsilon_a = D_y / (k\varphi). \quad (1)$$

Здесь φ , D_y – электрический потенциал и нормальная y -компонента индукции на поверхности пьезоэлектрической среды, k – волновое число. Существенное развитие импедансный метод получил после работы [1], в которой для случая ПАВ релейского типа на поверхности полубесконечного пьезоэлектрика в приближении слабой электромеханической связи было получено простое приближенное выражение для поверхностной эффективной диэлектрической проницаемости

$$\epsilon_a = \epsilon_p (k - k_\infty) / (k - k_0), \quad (2)$$

где k_∞ , k_0 – волновые числа ПАВ в случаях "открытой" и "закороченной" поверхностей пьезоэлектрика соответственно,

$$\epsilon_p = (\epsilon_{yy}\epsilon_{zz} - \epsilon_{yz}^2)^{1/2}, \quad (3)$$

ϵ_{ij} – соответствующие компоненты тензора диэлектрической проницаемости для YZ -среза.

Аппроксимация (2) применялась ранее только для полубесконечного однородного пьезоэлектрика и ПАВ релейского типа. Следует особо отметить, что поскольку значение ϵ_p имеет физический смысл диэлектрической проницаемости пьезоэлектрика в предельном случае нулевого пьезоэффекта, то не очевидно, какие константы диэлектрической проницаемости – измеренные при постоянном механическом напряжении ϵ_{ij}^T или при постоянной деформации ϵ_{ij}^S – необходимо использовать в (3).

В частности, компоненты тензора диэлектрической проницаемости ϵ_{ij}^T и ϵ_{ij}^S даже для слабых пьезоэлектриков с малыми значениями коэффициента электромеханической связи K существенно отличаются. В [1–7] отмечалось, что для полубесконечного пьезоэлектрика с точностью до членов K^2 необходимо использовать значения ϵ_{ij}^T . Это же следует, из общих физических соображений, т.е. в предельном случае при увеличении волнового числа k вдали от значений k_0 и k_∞ можно пренебречь