АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XIX 1973 Вып. 3

УДК 534.286

ЗАТУХАНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН В ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНКАХ СУЛЬФИДА КАДМИЯ

В. П. Демидов, А. А. Смирнов

В работе рассмотрен метод определения коэффициента электромеханической связи и затухания звука в поликристаллических текстурированных пленках пьезоэлектрика по измеренным параметрам составного резонатора, содержащего исследуемую пленку. Получены формулы, связывающие характерные частоты и ширину резонансного пика системы с основными параметрами пьезоэлектрического слоя. Экспериментальное исследование пленок сульфида кадмия на тонких сапфировых подложках показало, что коэффициент электромеханической связи K в поликристаллических текстурированных слоях CdS приближается к величине K монокристаллов CdS, а затухание звука в пленках значительно превышает затухание звука в монокристаллах, достигая 30 *дБ/см* на частоте 150 *Мгц*, и растет как квадрат частоты на более высоких частотах.

В связи с развитием акустики гиперзвука и широким применением упругих волн СВЧ диапазона для исследования свойств твердого тела и в различных радиотехнических устройствах все больший интерес вызывают акустические свойства тонких слоев вещества. Количественные характеристики таких слоев зависят от технологии получения и не всегда могут быть предсказаны на основании свойств массивных образцов того же вещества, что вызывает необходимость дополнительного исследования. Особый интерес представляют пьезоэлектрические пленки, в частности пленки сульфида кадмия. Несмотря на то что тонкие слои CdS широко используются в пьезоэлектрических преобразователях для линий задержки гигагерцового диапазона и в литературе имеется много сведений об этих устройствах [1—3], затруднительно извлечь из опубликованного материала сведения о характеристиках самих пьезоэлектрических пленок. Примером может служить большая разница в измеренных величинах коэффициента электромеханической связи пьезоэлектрических пленок [4—8] и отсутствие данных о величине затухания гиперзвука в пленках. Такое положение связано, во-первых, с тем, что частотная характеристика пьезопреобразователя линии задержки имеет большую ширину вследствие ухода энергии в звукопровод и мало зависит от собственной добротности пленки, и, во-вторых, с тем, что основную роль в устройствах типа линии задержки играют потери, связанные с отражением энергии, а не с диссипацией. Однако точные значения характеристического импеданса, скорости и затухания звука необходимы для оценки и инженерного расчета предельных параметров тонкопленочных устройств на объемных и поверхностных волнах. Целью данной работы является определение коэффициента электромеханической связи и затухания звука в напыленных пленках CdS. Для измерений был выбран резонансный метод, обеспечивающий наибольшую чувствительность при изучении акустических и пьезоэлектрических параметров. Однако в прямом виде [9] такой метод не применим для пленок толщиной 1—10 *мкм* и использовалось приближение к данному методу — метод составного резонатора, в котором тонкая пленка CdS возбуждала колебания более толстой (70—100 *мкм*) слабопоглощающей подложки.

Характеристики составного резонатора

Для исследований пленок сульфида кадмия были изготовлены лабораторные образцы составных резонаторов, которые представляли собой подложки из Al_2O_3 толщиной 70—100 *мкм*, одна из поверхностей которых металлизировалась слоем серебра толщиной 0,1—0,3 *мкм*. На металл напылялась исследуемая пленка сульфида кадмия, на которую наносился опять слой серебра той же толщины. Верхний и нижний слои металла являлись электродами составного резонатора. Аналогичные структуры с кварцем вместо Al_2O_3 были описаны в [10], однако автор ограничился только вопросами технических применений и не рассматривал свойства таких резонаторов и применение их для исследования тонких пленок пьезоэлектриков.

Расчет резонансных свойств такого устройства в одномерной модели не представляет сложности, и его результаты при пренебрежении акустическим влиянием тонких металлических электродов могут быть суммированы следующим образом.

Электрический импеданс системы в отсутствие поглощения имеет вид:

$$Z=\frac{1}{i\omega C_0}\left\{1-\frac{K^2}{\gamma}\frac{2B\cos 2L\cdot\gamma\sin_\gamma+\sin 2L\cdot\gamma\cos\gamma}{B\cos 2L\cdot\gamma\sin 2\gamma+\cos 2\gamma\sin 2L\cdot\gamma}\sin\gamma\right\}, \qquad (1)$$

где C_0 — статическая емкость преобразователя, $2\gamma=\frac{\omega h}{v_п}$, h — толщина слоя CdS, $v_п$ — скорость звука в пьезоэлектрике, B — отношение механических импедансов пьезоэлектрика и подложки, L — отношение времен распространения звука в подложке и пьезоэлектрической пленке.

Из (1) следует, что точки антирезонанса системы γ_A определяются уравнением

$$\operatorname{tg} 2L\gamma_A+B\operatorname{tg} 2\gamma_A=0. \qquad (2)$$

Точки резонанса $\gamma_р$ можно получить из уравнения (1), полагая $Z=0$; тогда, опуская малые члены порядка K^4, имеем для $x_р=\gamma_A-\gamma_р$:

$$x_р=\frac{BK^2}{4\pi\gamma_A}\frac{(1-\cos 2\gamma_A)^2}{B+L(\cos^2 2\gamma_A+B^2\sin^2 2\gamma_A)}. \qquad (3)$$

Нетрудно убедиться, что подстановка (3) в (1) действительно дает нуль с точностью до членов порядка K^2.

Для учета затухания звука в пленке и подложке положим обычным образом, что волновое число звука k есть величина комплексная: $k=k'+i\varkappa$, где $\varkappa$ — коэффициент затухания звука. Для пьезоэлектрика и подложки выполняется с большим запасом неравенство $\varkappa l\ll 1$, где $\varkappa$ относится или к пленке, или к подложке, а l — соответственно толщина пленки или подложки; воспользовавшись этим обстоятельством, разложим все члены, содержащие $\varkappa$, в ряд; тогда оставляя только линейные по $\varkappa$ члены, получим вблизи точек антирезонанса:

$$|Z_{рез}|=Z_0\sqrt{1+\frac{x_m{}^2A^2-2Axx_m}{x_m{}^2+x^2}}, \qquad (4)$$

где A — медленно меняющаяся вблизи антирезонанса функция

$$A=\frac{K^2B}{\gamma_A}\frac{(1-\cos 2\gamma_A)^2}{\varkappa_{эф}},\quad Z_0=\frac{1}{\omega C_0},\quad x=\Delta_A-\gamma, \qquad (5)$$

а

$$x_m=\frac{\varkappa_{эф}}{2[B+L(\cos^2 2\gamma_A+B^2\sin^2 2\gamma_A)]}. \qquad (6)$$

Эффективный коэффициент затухания звука $\varkappa_{эф}$, входящий в (5) и (6), связан с параметрами системы соотношением

$$\varkappa_{эф} = B\varkappa_п + \varkappa_з(\cos^2 2\gamma_A + B^2 \sin^2 2\gamma_A), \tag{7}$$

где $\varkappa_п$ и $\varkappa_з$ — коэффициенты затухания звука в пьезоэлектрике и подложке соответственно.

Экстремумы модуля импеданса достигаются в точках

$$x = \frac{\sqrt{A^2+4} \pm A}{2} x_m; \tag{8}$$

экстремальные значения модуля импеданса в этих точках равны соответственно:

$$|Z|_{макс} = Z_0 \frac{\sqrt{A^2+4}+A}{2}, \qquad |Z|_{мин} = Z_0 \frac{2}{\sqrt{A^2+4}+A}. \tag{9}$$

Ширина резонансной кривой по уровню 0,7 от максимального определяется формулой

$$\Delta x_{0,7} = 4x_m \frac{\sqrt{3A^2 + A\sqrt{A^2+4} - 1}}{A\sqrt{A^2+4} + A - 2}. \tag{10}$$

Соотношение между величинами соседних резонансных пиков зависит от двух факторов: излучательных свойств пленки и частотной зависимости затухания звука. Если затухание звука происходит в основном в подложке и слабо зависит от частоты, то огибающая к экстремальным значениям импеданса, как нетрудно получить из формул (5) — (9), повторяет частотный ход сопротивления излучения пленки на полубесконечной среде [11].

Ясно, что из приведенных выше формул (5) — (9) можно вычислить значения основных параметров системы — K^2 и $\varkappa_{эф}$.

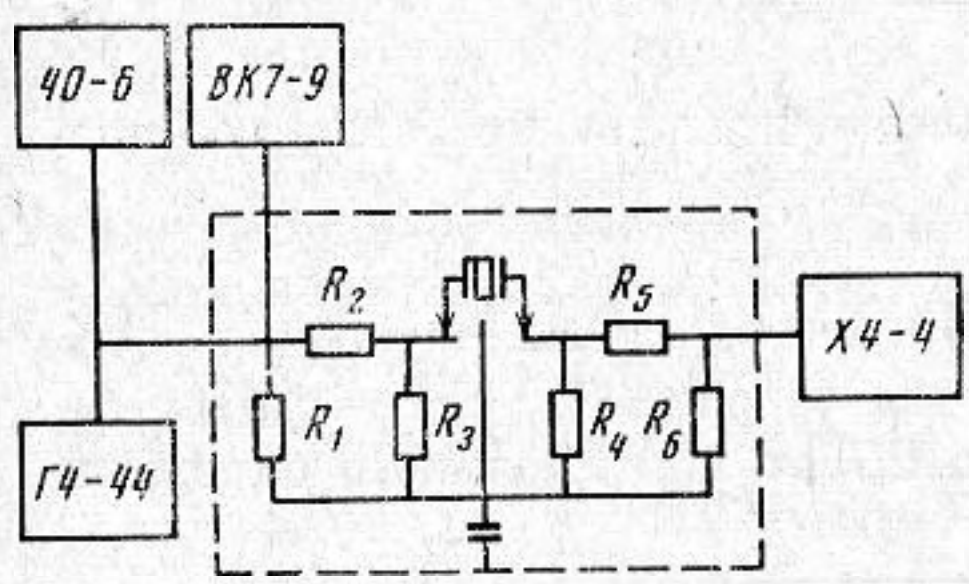
Экспериментальные образцы и методика измерений

Экспериментальные образцы были получены на полированных пластинках из Al_2O_3 толщиной 70—100 *мкм*, которые отрезались от стержней, в которых среднее затухание звука на частоте 120 *МГц* составляло 0,3—0,5 *дБ/см*. Напыленные пленки CdS были поликристаллическими, хорошо ориентированными текстурами чисто гексагональной фазы. Отклонение гексагональных осей отдельных кристаллитов от направления, перпендикулярного к подложке, составляло не более 7—8°. С помощью электронного микроскопа изучалось распределение кристаллитов по размерам, оказалось, что средний размер кристаллита составляет (в плоскости пленки) 0,16 *мкм*, а число кристаллитов такого размера — около 10% от общего числа. Имелись также кристаллиты бóльших размеров — вплоть до 0,7 *мкм*; 50% кристаллитов имели средний размер более 0,13 *мкм*. Распределение кристаллитов по размерам соответствовало нормальному закону с дисперсией 0,125 *мкм*.

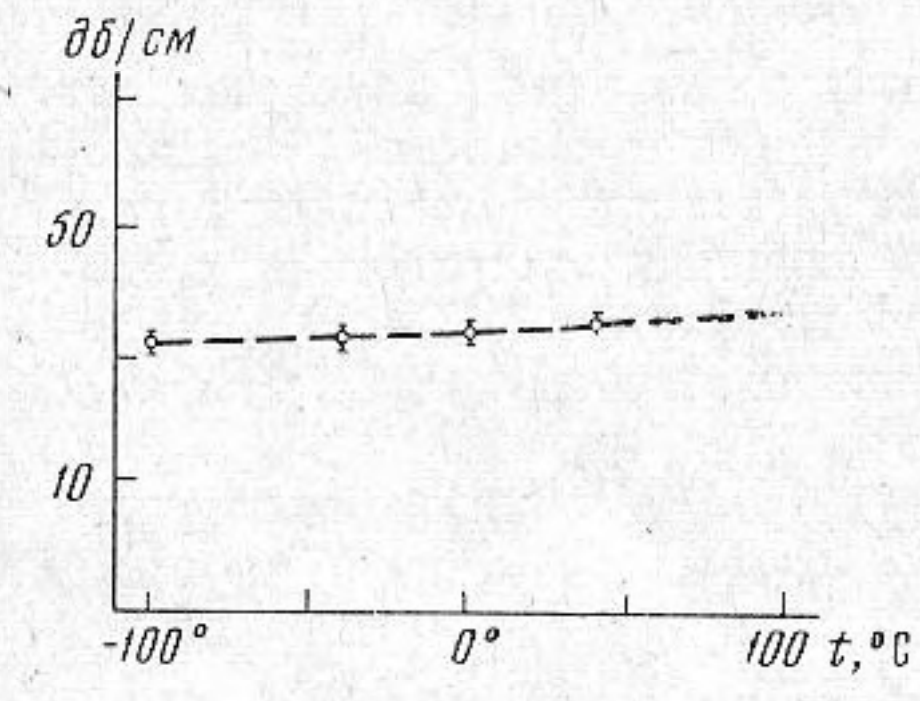
Измерение формы резонансной кривой производилось путем измерения частотной зависимости коэффициента передачи П-образного коаксиального четырехполюсника, в который включался исследуемый образец. Блок-схема измерений приведена на фиг. 1, где представлены генератор Г4-44, частотомер Ч0-6, измерительный вольтметр ВК7-9 и измерительный усилитель Х4-4. В четырехполюсник включены сопротивления: R_2, R_5 — 100—200 *ом*, R_3, R_4 — 2—6 *ом*, R_1, R_6 — 100—150 *ом*. Выбранная схема обеспечивает бóльшее разрешение по частоте (до $5 \cdot 10^{-5}$ измеряемой величины), чем измерительные мосты дециметрового диапазона.

Результаты эксперимента и их обсуждение

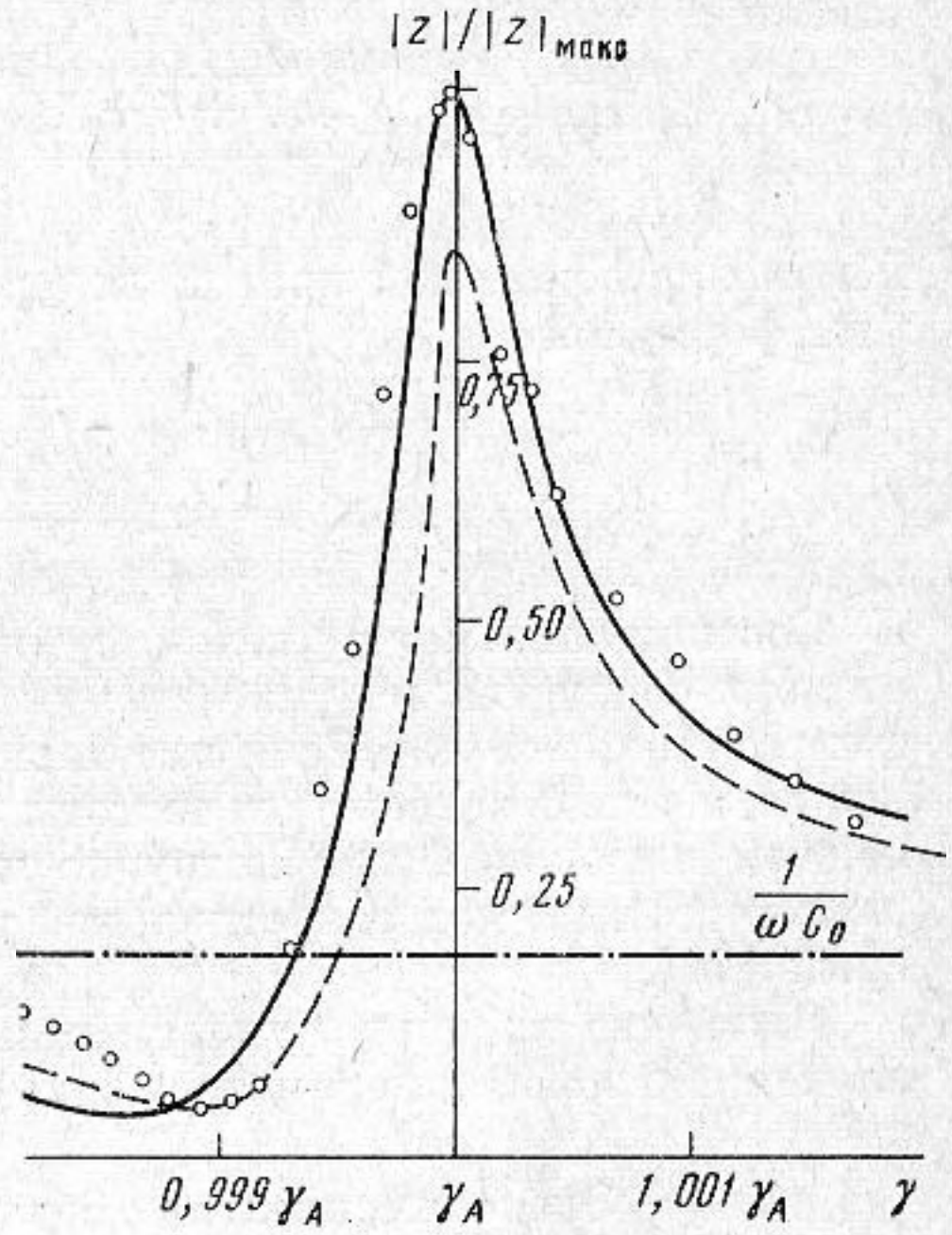
Определение параметров пьезоэлектрических пленок производилось по ранее приведенным формулам. Измеренные величины Z_0 и $|Z|_{макс}$ (или $|Z|_{мин}$) использовались для определения значения A, а по эксперимнтальной ширине резонансной кривой на уровне 0,7 и толщине пленки CdS находилось значение x_m. Полученные значения A и x_m позволяют найти частоту антирезонанса f_A и все остальные



Фиг. 1



Фиг. 3

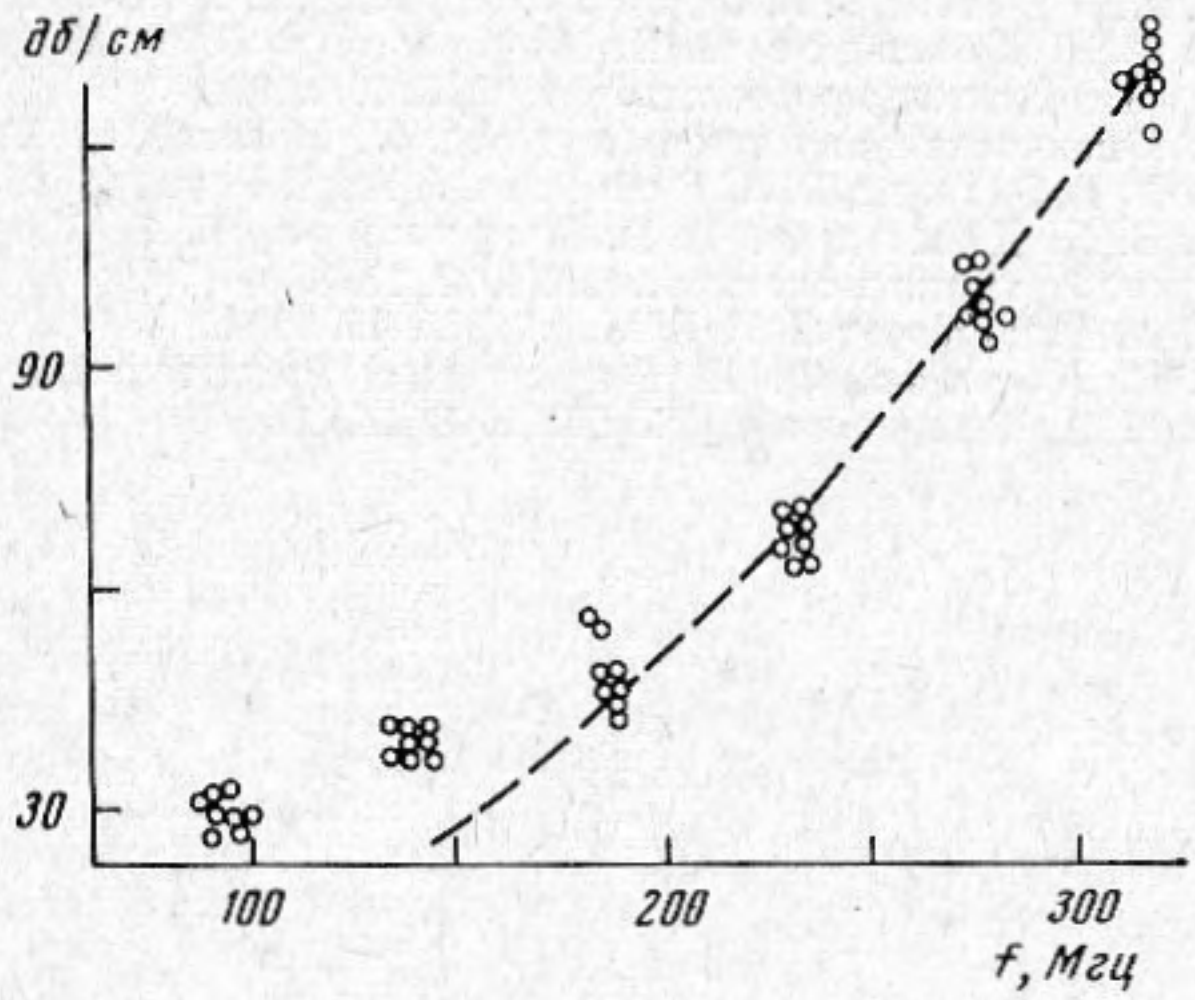


Фиг. 2

параметры по формулам (5) — (8). Для проверки полученных значений по найденным параметрам одного из резонаторов построена по формуле (4) теоретическая форма резонансной кривой (сплошная линия на фиг. 2, $A = 5{,}03$, $x_m = 1{,}17 \cdot 10^{-4}$). Видно, что совпадение экспериментальных точек и расчетной кривой весьма хорошее везде, кроме окрестностей точки резонанса. Если при расчете исходить из минимального значения модуля импеданса $|Z|_{мин}$, то можно добиться согласованности результатов около точки резонанса (пунктирная кривая на рис. 2, $A = 4{,}22$, $x_m = 1{,}12 \cdot 10^{-4}$), однако такой подход ухудшает совпадение расчета и эксперимента во всех остальных точках. По-видимому, при измерении малых значений импеданса вблизи резонанса влияют паразитные связи в измеряемом четырехполюснике, в связи с этим при обработке результатов использовались максимальные значения импеданса. Для приведенных значений параметров резонатора получается $K^2 = 2{,}3 \cdot 10^{-2}$, $\varkappa_{эф} = 15$ *дБ/см*.

По аналогии с кварцевыми резонаторами можно было бы ожидать существенного влияния качества полировки поверхности на форму резонансной кривой. Полученное хорошее согласие расчета и эксперимента, видимо, говорит о том, что при таких больших значениях затухания звука основную роль играют процессы, происходящие в пленке CdS. Это подтверждается и тем фактом, что различие в резонансных свойствах образцов всегда соответствует разнице структур пленок, нанесенных на

одинаково обработанные подложки. Следует отметить, что для всех измеренных образцов K^2 оказалось весьма близким к значению K^2 монокристалла CdS. Возможно, это объясняется тем, что для измерений отбирались только образцы с хорошо выраженными резонансными свойствами. При пренебрежении затуханием в подложке средний коэффициент затухания в пленках составляет 30 *дБ/см*. Точность полученных результатов оценивается в 10—15%.



Фиг. 4

Полученное большое значение коэффициента затухания звука может быть обусловлено либо поглощением на свободных носителях, либо поликристалличностью пленки. Для выяснения природы была измерена температурная и частотная зависимость затухания звука в тонкой пленке. Возможность измерения частотной зависимости обеспечивается тем, что экспериментальные образцы имеют ряд резонансов, частоты которых определяются из (2), причем величины последующих резонансных пиков не убывают монотонно, как это имеет место у кварцевого резонатора. Результаты измерения частотной и температурной зависимости затухания звука представлены на фиг. 3 и 4. Видно, что температурная зависимость довольно слабая, а частотная может быть представлена как $\sqrt{f}$ при $f < 180$ *МГц* и как f^2 при бо́льших частотах. Эти закономерности заставляют считать, что затухание обусловлено поликристалличностью пленки по двум причинам: 1) затухание на свободных носителях должно быть пропорционально f^2 на малых частотах с последующим уменьшением показателя степени [12]; 2) при обычных для пленок CdS донорных уровнях 0,4—0,5 *эВ* [13] изменение температуры от -100 до $+100°$ С приводит к изменению концентрации электронов на 3 порядка; трудно представить, что при таком изменении и концентрации затухание на свободных носителях изменится всего на 20%.

Видимо, можно сделать вывод о том, что затухание звука в тонких пленках CdS определяется поликристалличностью. К сожалению, до настоящего времени не рассмотрен вопрос о затухании звука в текстурированных структурах, так что невозможно провести окончательное сравнение полученных результатов с теорией. Отметим только, что найденные частотные зависимости $\sqrt{f}$ и f^2 не противоречат теории для хаотически ориентированных кристаллитов [14].

В заключение авторы приносят благодарность Б. Бобикову и В. Васильеву за помощь в изготовлении образцов и проведении измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. N. F. Foster, G. A. Coquin, G. A. Rosgonyi, F. A. Vannatta. IEEE Trans. Ultrasonics Eng., **SU-15**, No. 1, p. 28 (1968).
2. К. И. Врицын, В. П. Демидов, Л. А. Иванов, В. П. Мартынов, В. Ф. Мочалов, Ю. И. Рогозин, А. А. Смирнов. Радиотехника и электроника, 1969, **14**, 1, 2074.
3. Л. М. Беляев, Э. А. Магомедов, Ю. В. Писаровский, С. А. Семилетов, И. М. Сильвестрова. Физ. тв. тела, 1969, **11**, 5, 1351.

4. N. F. Foster. 1968. Sendae Symposium on Aconstoelectronics, sendai, Japan, Ayg. 1968, p. 11.
5. F. M. Reeder. Proc. IEEE, 1967, 58, 1099.
6. J. de Klerk. J. Appl. Phys., 1966, 37, 12, 4522.
7. A. J. Blahr, J. N. Court. J. Appl. Phys., 1968, 39, 6, 2869.
8. В. П. Демидов, В. П. Мартынов, Б. Ф. Мочалов, А. А. Смирнов. Физ. и техн. полупроводников, 1969, 3, 10, 1598.
9. Физическая акустика (под ред. У. Мэзона), т. 1А, гл. 4, М., «Мир», 1966.
10. T. R. Sliker, D. A. Roberts. J. Appl. Phys., 1962, 38, 5, 2350.
11. В. П. Демидов, В. П. Мартынов, В. Ф. Мочалов, А. А. Смирнов. Радиотехника и электроника, 1972, 17, 3.
12. A. B. Pippard. Phil. Mag., 1955, 46, 1104.
13. С. Абдиев, Ф. И. Вергунас, Радиотехника и электроника, 1965, 10, 1353.
14. М. А. Исакович. ЖЭТФ, 1948, 18, 386.

Поступила
4 августа 1971 г.