На фиг. 2 представлены частотные характеристики потерь кварцевых линий задержки, в которых использовались преобразователи *1*, *2*, *3* и *4*. Идентичность частотных характеристик излучающего и приемного преобразователей обеспечивалась тем, что оба преобразователя получались в результате деления на две части одного полностью изготовленного преобразователя *1*, *2*, *3* и *4*. Схема измерений была стандартной. Из-за акустического рассогласования между CdS и плавленным кварцем частотные характеристики оказывались покрытыми «рябью» [5]. Поскольку «рябь» в на-

№ преобразователя	f_0, *Мгц*	$\frac{\Delta f}{f_0}$, %	α_{min}, *дб*	Изменение параметров со временем	Способ изготовления, T — температура, t — время термообработки
1	204	30	41	есть	отжиг при $T = 400°$, $t = 10$ *мин*
2	200	90	77	не наблюдалось	нагрев при напылении $T = 450°$, $t = 14$ *мин*
3	100	60	50	есть	отжиг при $T = 400°$, $t = 30$ *мин*
4	111	84	80	не наблюдалось	нагрев при напылении $T = 450°$, $t = 40$ *мин*

шем случае самостоятельного интереса не представляет, то на фиг. 2 дано усредненное значение коэффициента потерь $\alpha = 20 \lg U_{изл} / E_{пр}$, где $U_{изл}$ — амплитуда напряжения на излучающей пластинке, $E_{пр}$ — амплитуда э.д.с. на приемной пластинке. Основные характеристики преобразователей и линий задержки сведены в таблицу. Ширина полосы Δf отсчитывалась на уровне 3 *дб* от минимального значения потерь α_{min}, соответствующего резонансной частоте f_0.

Из фиг. 1, фиг. 2 и таблицы видно, что преобразователи *2* и *4*, имеющие меньший градиент концентрации меди, являются более широкополосными. Увеличение широкополосности сопровождается увеличением потерь; например, увеличение относительной ширины полосы на 60% (преобразователи *1*, *2*) влечет за собой увеличение потерь на 36 *дб*. Следует ожидать, что влияние низкотемпературной диффузии может быть уменьшено так же применением вместо меди других акцепторных примесей, имеющих меньший коэффициент диффузии в CdS, например, таких, как серебро или золото.

В заключение автор выражает благодарность Л. Д. Розенбергу за внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. N. F. Foster. The performance of dilatational mode cadmium sulphide diffusion — layer transducers. IEEE Trans. on ultrason. eng., 1963, UE — 10, 39—44.
2. R. L. Clarke. The diffusion of copper in cadmium sulfide crystals J. Appl. Phys., 1959, **30**, 957.
3. W. A. Crofut, R. D. Mc Arthur. Low temperature copper diffusion limits frequency range of diffusion — layer transducer. Proc. IEEE, 1965, **53**, 9, 1276.
4. Е. К. Грищенко, Л. А. Сысоев. Метод исследования характеристик диффузионных слоев в полупроводниковых кристаллах. Акуст. ж., 1967, **13**, 3, 361—366.
5. В. В. Проклов, О. А. Крейнин, А. И. Морозов, В. С. Бондаренко. Преобразователи ультразвука на обедненном слое в CdS. Радиотехн. и электрон., 1966, **11**, 5, 954—958.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступило в редакцию
15 августа 1966 г.

УДК 534.121

ЗАТУХАНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН В ПЛАСТИНАХ

Т. М. Каёкина

В настоящее время в ультразвуковых линиях задержки широко используются так называемые поперечные нормальные волны, имеющие только одну компоненту смещения, перпендикулярную направлению распространения и параллельную поверхности пластины [1—4]. Многие свойства и характеристики этих волн известны; однако вопрос о зависимости коэффициента затухания этих волн от частоты и параметров пластины до сих пор не был изучен.

Чтобы получить представление о величине коэффициента затухания поперечных нормальных волн, удобно установить зависимость его от хорошо изученного и легко измеряемого коэффициента затухания поперечных волн в сплошной среде [5]. Для этого воспользуемся обычным способом представления затухания посредством введения мнимой части в волновые числа. Пусть $k_t = k_t' + ik_t''$ — волновое число поперечной волны, $k_n = k_n' + ik_n''$ — волновое число поперечной нормальной волны номера n. Предположим, что затухание мало, так что $k_t'' \ll k_t'$ и $k_n'' \ll k_n'$. Подставив k_t и k_n в дисперсионное уравнение поперечных нормальных волн, получим в линейном приближении $k_n'' = Ak_t''$, где

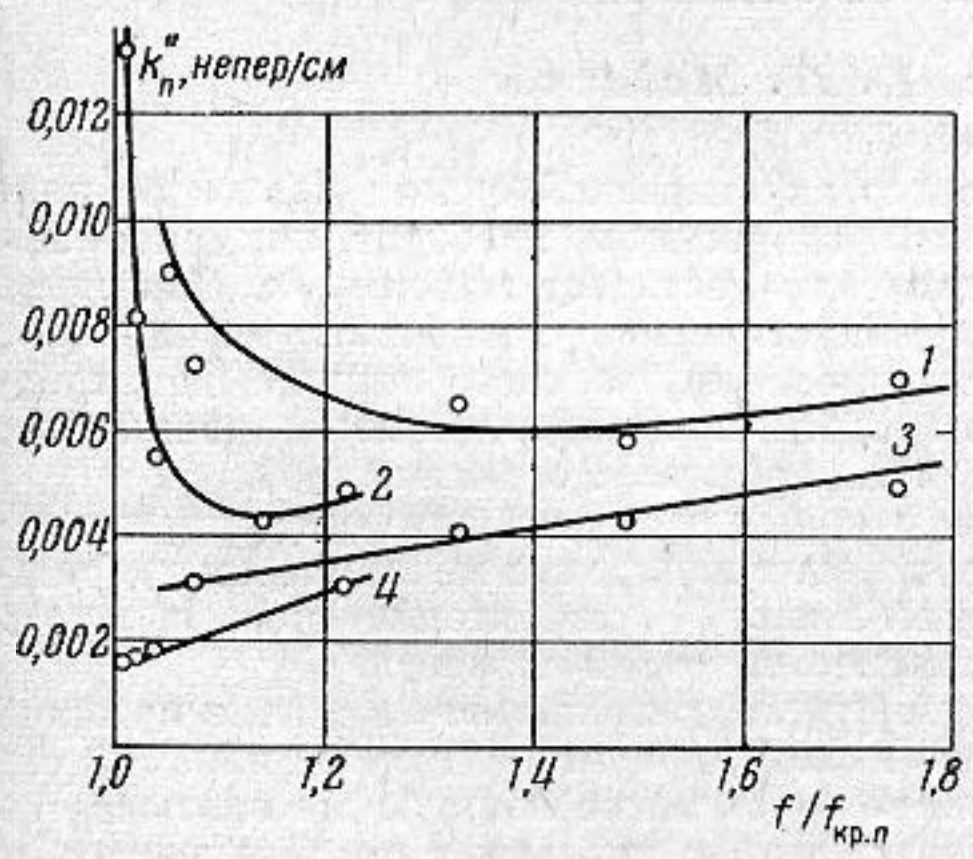
$$A = \left[1 - \left(\frac{n}{4}\right)^2 \left(\frac{\lambda_t}{h}\right)^2\right]^{-1/2} = \left[1 - \left(\frac{f_{\text{кр.}n}}{f}\right)^2\right]^{-1/2} = \frac{c_n}{c_t}.$$

Здесь n, c_n — соответственно номер и фазовая скорость поперечной нормальной волны в пластине, λ_t, c_t — длина волны и фазовая скорость поперечной волны, $2h$ — толщина пластины, $f_{\text{кр.}n}$ — критическая частота появления n-й нормальной волны; f — частота.

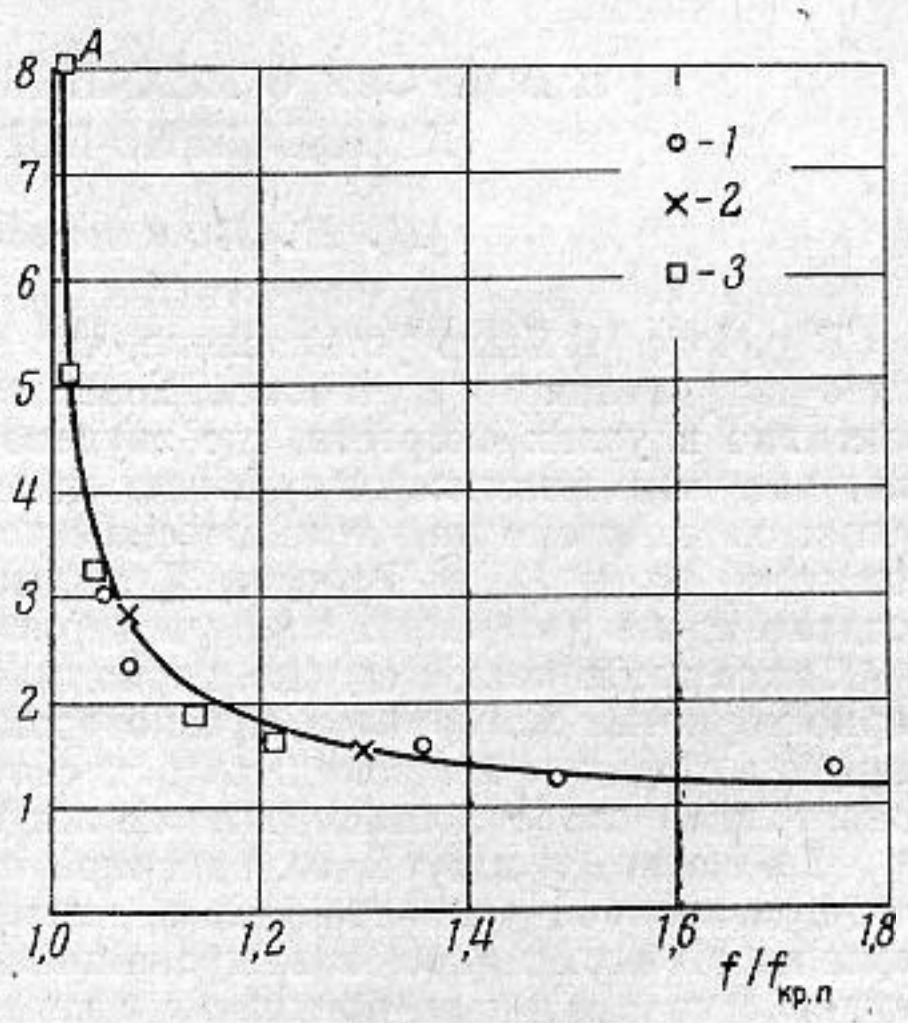
Таким образом, коэффициент затухания поперечной нормальной волны в пластине есть линейная функция коэффициента затухания поперечной волны. Численное значение коэффициента A определяется номером волны и отношением длины поперечной волны к толщине пластины (или отношением частоты к критической частоте) и равно отношению фазовых скоростей c_n / c_t. Для нулевой нормальной волны $A = 1$ и $k_0'' = k_t''$.

Экспериментальная проверка зависимости k_n'' и A от отношения $f / f_{\text{кр.}n}$ была проведена для трех нормальных волн ($n = 1$, 2 и 3). Затухание измерялось импульсным методом по спаданию амплитуды с расстоянием в диапазоне частот 1,8—3,1 *Мгц* при длительности импульса 50—100 *мксек*; последняя величина выбиралась из условия разделения сигналов во времени. Отдельные нормальные волны идентифицировались путем снятия дисперсионной кривой для каждого импульса. Исследования проводились на пластинах из дюралюминия марки АМЦАМ длиной 120, шириной 25 и толщиной 0,10; 0,15 и 0,20 *см*. Для снижения помех, обусловленных конечными размерами пластин, края пластин были покрыты пластилином. Поперечные нормальные волны возбуждались и принимались кварцевыми пластинками ($0{,}9 \times 1{,}8$ *см*^{2}) Y-среза. В качестве контактных переходных слоев использовались церезин и эпоксидная смола.

Измерение затухания производилось по следующей схеме. Излучатель приклеивался непосредственно к поверхности пластины; амплитуда измерялась приемником в десяти точках, расположенных на разных расстояниях R_k от излучателя. Убывание амплитуды сигнала вследствие расхождения волнового пучка учитывалось множителем $1/\sqrt{R_k}$. Коэффициент затухания поперечных нормальных волн рассчитывался как частное логарифма отношения амплитуд в двух точках и расстояния между этими точками.



Фиг. 1



Фиг. 2

Для устранения систематических ошибок, вносимых перекосом излучателя и приемника и возможной неоднородностью структуры дюралюминиевых пластин, излучатель переклеивался 3 раза. Чтобы исключить ошибки, вызываемые различием толщины контактного переходного слоя, значение амплитуды в каждой точке определялось как среднее арифметическое из 10 измерений.

На фиг. 1 приведены полученные экспериментально зависимости коэффициентов затухания 1 и 3 поперечных нормальных волн k_n'' от отношения частоты к критической частоте $f / f_{кр.n}$ (кривые *1* и *2*) и коэффициенты затухания поперечных волн (равные k_0''), измеренные соответственно на тех же пластинах и частотах (кривые *3* и *4*). Из графиков видно, что с увеличением частоты f от значения $f = f_{кр.n}$ коэффициент затухания k_n'' быстро уменьшается (пропорционально c_n / c_t), достигает своего минимального значения и затем плавно возрастает с частотой.

Сопоставление экспериментальных результатов с расчетом приведено на фиг. 2. Сплошной линией нанесена расчетная кривая зависимости коэффициента A от $f / f_{кр.n}$. Точками нанесены значения отношений экспериментально измеренных величин коэффициентов затухания поперечных нормальных волн и поперечных волн k_n'' / k_t''. Обозначение *1* соответствует $n = 1$, *2* — $n = 2$ и *3* — $n = 3$. Относительное отклонение экспериментальных точек от теоретической кривой не превышает 12—15%. Это позволяет сделать вывод о возможности определения (с достаточной степенью точности) коэффициента затухания поперечных нормальных волн по известным значениям коэффициентов затухания поперечных волн.

В заключение автор выражает глубокую благодарность Л. С. Грищенко за участие в проведении опытов.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. M. Ewing, W. S. Jardetzky, F. Press. Elastic waves in layered media. M. C. Graw — Hill, New York, 1957.
2. V. T. Buchwald. Transverse waves in elastic plates. J. Mech. Appl. Math., 1958, 9, 4, 498—508.
3. Meitzler. Ultrasonic delay lines using shear modes in strips. IRE Trans. Ultrason. Eng. UE, 1960, 7, 2, 35—43.
4. Mario Onoe. Mechanical input admittance of ultrasonic delay-lines operating in torsional or Shear-Modes. J. Acoust. Soc. America, 35, 7, 1003—1008.
5. Л. Бергман. Ультразвук и его применение в науке и технике. М., ИЛ, 1957.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступило в редакцию
31 января 1966 г.

УДК 534.222.532.507

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ АКУСТИЧЕСКОЙ СУШКИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. В. Каменкович, Е. П. Медников

В работе [1] было установлено, что процесс акустической сушки протекает наиболее эффективно в пучностях колебательной скорости и, наоборот, наименее эффективно в узлах скорости, где звуковое давление достигает максимума. Последнее означает, что интенсифицирующее действие акустических колебаний на процесс сушки обусловлено не периодическим разрежением окружающего воздуха, как предполагали Буше [2] и Грегуш [3], а колебательным и циркуляционным движением воздуха вдоль доступных звуку поверхностей материала, т. е. конвекцией.

Такое заключение, однако, верно лишь в отношении первой стадии сушки капиллярно-пористых материалов, при которой происходит испарение механически удерживаемой в порах и макрокапиллярах свободной влаги [4], характеризующееся, как и испарение со свободной поверхности жидкости, постоянством скорости.

Что касается второй, замедленной стадии сушки капиллярно-пористых материалов, при которой удаляется влага, связанная молекулярными (адсорбционными) силами на стенках макро- и микрокапилляров, то здесь такое объяснение оказывается неудовлетворительным, поскольку в капиллярах, размер которых в пределе достигает 10^{-4} *см* и менее, движение воздуха сильно заторможено или вовсе отсутствует вследствие влияния вязкости.

Грегуш [3] высказал предположение, что на второй стадии сушки увеличению ее скорости способствует увеличение влагопроводимости материала вследствие уменьшения вязкости озвучиваемой жидкости, пульсаций находящихся в порах и капиллярах пузырьков воздуха и радиационного давления звука, однако из-за сильного затухания звука в порах и капиллярах все эти эффекты не могут возникать или будут очень слабы.