

поле излучения моделей не ограничивается мультипольным излучением пятого порядка, а представляет совокупность излучений набора пространственных гармоник. При этом наиболее высокий уровень звукового давления создается гармоникой с $n=5$, излучение которой и наблюдается в эксперименте.

У неоднородной оболочки под действием неоднородности происходит деформация распределения колебательной скорости $\vartheta(\varphi)$, мера которой определяется коэффициентом A_n . Из-за наличия деформации поле излучения такой оболочки представляет набор пространственных гармоник, соответствующих резонансной форме колебания. В этом случае в выражениях (1), (2) необходимо учитывать все члены суммы. Пространственные гармоники ($n=0, 1, 2, 3, \dots$), входящие в состав общего поля излучения неоднородной ЦО, как отмечалось выше, ведут себя по-разному с увеличением расстояния от излучающей поверхности. Различие в их поведении можно проиллюстрировать в ближнем поле, представив функции Ханкеля, входящие в выражение (2), в виде рядов при малых значениях аргументов ($kr \ll 1, ka \ll 1$):

$$\frac{H_n^{(1)}(ka)}{[H_n^{(1)}(ka)]'} = -\frac{k}{n} a \left(\frac{r}{a}\right)^{-n}; \quad (n \geq 1, \frac{r}{a} > 1). \quad (3)$$

Из соотношения (3) видно, что с увеличением номера формы n поле излучения убывает как n^{-1} и очень резко убывает с увеличением расстояния от поверхности оболочки как $(a/r)^n$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лиходед А.И., Малинин А.А. Колебания подкрепленных оболочек вращения с сосредоточенными массами и осцилляторами//МТТ. 1971. № 1. С. 42–47.
2. Иванов В.С., Плахов Д.Д. Колебания кругового кольца несущего сосредоточенную массу//Инж. журн. 1963. Т. 3. № 3. С. 482–489.
3. Дудник Р.А., Музычук О.В., Фияксель Э.А. Излучение звука цилиндрической оболочки с локальной массой//Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 5. С. 834–840.
4. Дудник Р.А., Колпаков А.Б., Фияксель Э.А. Критерии подобия задачи о колебаниях и излучении неоднородной цилиндрической оболочки//Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 2. С. 372–374.
5. Казаков В.В. Ультразвуковой фазовый измеритель виброперемещений: А.с. 1413420 (СССР)//Б.И. 1988. № 28. С. 167.
6. Антонец В.А., Казаков В.В. Ультразвуковой измеритель перемещений (вибромметр). Препринт ИПФ АН СССР № 112. Горький, 1984.
7. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. Л.: Судостроение, 1972. 348 с.

Нижегородский архитектурно-строительный институт

Поступило в редакцию
25.10.91

УДК 534.25:534.8

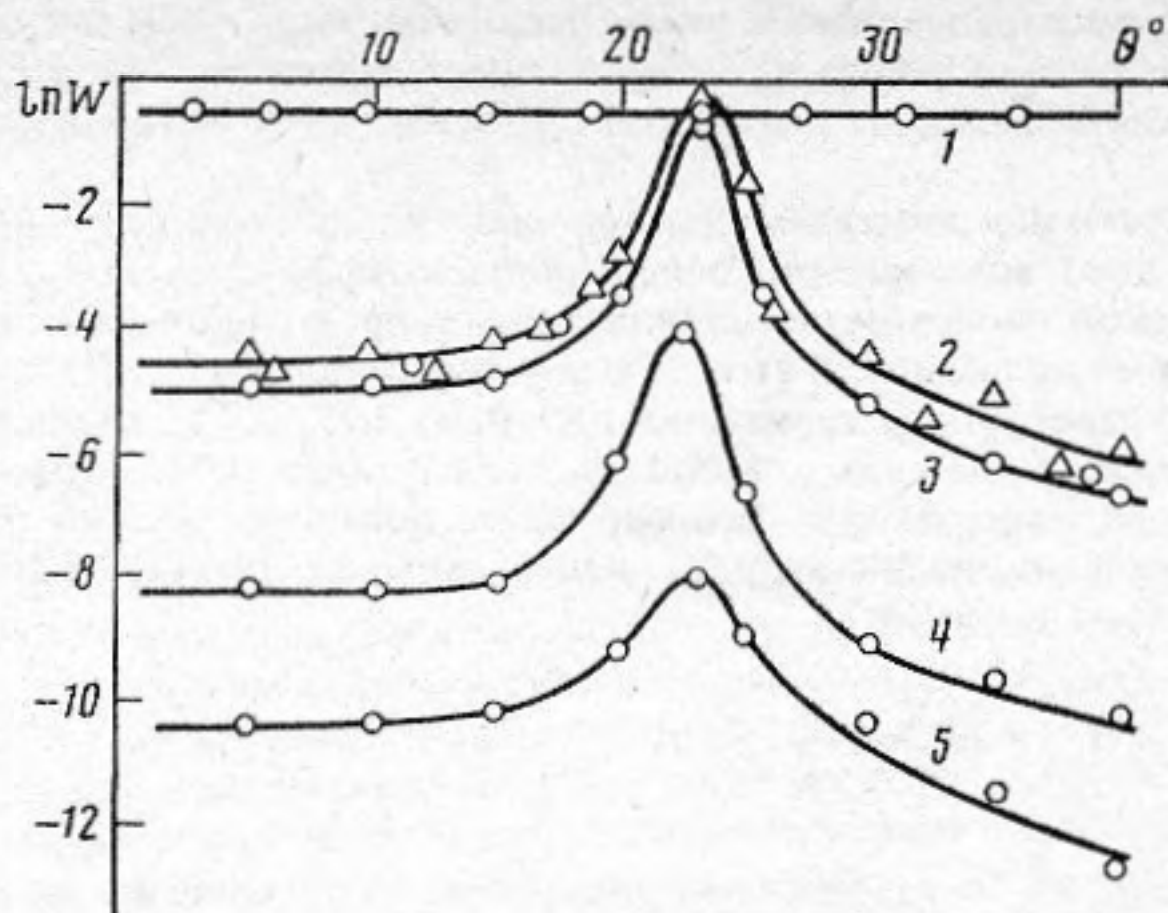
© 1992 г. Ю.С. Кольцов, И.С. Кольцова, С.В. Семенова

ПРОХОЖДЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ЧЕРЕЗ ТОНКОСЛОЙНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В работе проведено экспериментальное исследование коэффициента прохождения W ультразвуковых волн через композиции тонкослойных материалов. В качестве подложек использовались кремниевые диски ориентации [001], радиус которых составлял 75 мм, толщина $h \sim 380$ мкм. На поверхности дисков в первом случае напылялись полимерные пленки полипараксилилена (ППК) толщиной 15 мкм. Во втором – создавались слои ППК с включенными в него частицами кадмия с размерами 1–3 мкм. Общая толщина пленки составляла 120 мкм, впоследствии ее можно было отслоить и исследовать прохождение ультразвуковых волн через гетерогенную пленку непосредственно. В третьем случае на предыдущую композицию напылялся слой чистого ППК толщиной 15 мкм.

Такие тонкослойные композиционные материалы приобретают все большее значение при совершенствовании элементной базы в микроэлектронике, так как с помощью различных функциональных добавок в полимерное покрытие можно в широком диапазоне варьировать параметры гетерогенного слоя.

Измерения проводились в импульсном режиме в кювете, в которой исключалось появление отраженных от стенок кюветы сигналов [1]. Излучающий, приемный пьезодатчики, имеющие апертуру $3 \cdot 10^2$ мм², и образец помещались в иммерсионную жидкость так, чтобы нормали, проходящие



Угловая зависимость коэффициента прохождения через тонкослойные композиционные материалы: 1 — пленка ППК с частицами кадмия; 2 — кремний; 3 — кремний с покрытием из ППК; 4 — кремний с покрытием из ППК с частицами кадмия; 5 — образец 4 с покрытием ППК

через их центры, лежали на одной прямой. Образец полностью перекрывал ультразвуковой луч, мог вращаться вокруг вертикальной оси, что позволяло измерять угловую зависимость $W(\theta)$. В качестве иммерсионной жидкости бралась дистиллированная вода.

Прежде чем исследовать функциональные зависимости коэффициента прохождения ультразвуковых волн через композиционные материалы, было измерено распределение давления в акустических лучах в плоскости падения на приемный пьезодатчик, прошедших сначала только через иммерсионную жидкость, потом через иммерсионную жидкость с помещенными в нее образцами. Было установлено, что диаметр ультразвукового пучка с точностью до 10% сохраняется неизменным во всех случаях.

Таким образом, можно считать, что излучаемые плоские ультразвуковые волны после прохождения через структурно-неоднородные тонкослойные материалы сохраняют коллинеарность волнового вектора оси падающего ультразвукового луча, т.е. остаются плоскими.

Результаты исследования изменения амплитудного коэффициента прохождения $W = P_\theta/P_0$, где P_θ, P_0 — давления падающей и прошедшей через образец волн соответственно, от угла падения представлены графиками на рисунке.

Угловая зависимость коэффициента прохождения ультразвуковых волн через тонкую кремниевую пластинку с ориентацией базового среза [001] представлена графиком 2. Из графика видно, что тонкий слой кремния значительно ослабляет нормально падающий на него ультразвуковой луч $W \sim 10^{-2}$. В области углов 23° отмечается четко выраженное просветление.

В теоретических работах [2–4] рассматривается эффект просветления, связанный с возбуждением падающей волной в тонкой пластинке изгибных волн при условии совпадения скорости следа ультразвуковой волны вдоль пластинки со скоростью свободных изгибных волн в пластинке. В этом случае

$$\xi = \xi_a, \quad \xi = (\omega/c) \cos \theta, \quad \xi_a^4 = 12 \xi_s^2 / h^2, \quad \xi_s = \omega / c_s, \quad c_s = E_1 / \rho, \quad (1)$$

$$E_1 = E(1 - \sigma^2), \quad E = (3\lambda + 2\mu)\mu(\lambda + \mu)^{-1}, \quad \sigma = \lambda[2(\lambda + \mu)]^{-1},$$

c — скорость звука в иммерсионной жидкости, ξ, ξ_s, ξ_a — волновые числа продольных волн в жидкости, симметричных и изгибных волн в пластинке соответственно, c_s — скорость симметричных волн в пластинке, λ, μ — коэффициенты Ламэ, которые выражаются через соответствующие модули упругости [5].

Коэффициент прохождения

$$W = Z(Z_s - Z_a) [(Z + Z_a)(Z + Z_s)]^{-1}, \quad (2)$$

где Z_s, Z_a — импедансы симметричных и антисимметричных волн.

Оценки, проведенные по приведенным выше формулам (1), (2) при $\theta = 32^\circ$, дали следующие результаты:

$$\xi \sim 4 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}, \quad \xi_a \sim 4 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}, \quad W \sim 1,$$

т.е. при угле падения ультразвуковых волн на пластинку, равном 23° , волна должна почти полностью проходить через нее, что согласуется с полученными экспериментальными результатами.

Покрyтия демпфировали изгибные колебания, причем степень демпфирования зависела от свойств и конструкции покрyтий. Тонкая 15 мкм пленка ППК прозрачная для ультразвуковых волн, напыленная на кремниевый диск, незначительно уменьшала величину коэффициента прохождения (см. кривую 3).

Нанесение гетерогенного покрyтия (ППК с частицами кадмия), сохраняя анизотропную зависимость коэффициента прохождения, понижало более чем на порядок величину коэффициента прохождения при всех углах падения ультразвуковых волн (кривая 4).

Угловая зависимость коэффициента прохождения ультразвуковых волн, прошедших через отслоенную от подложки пленку ППК с частицами кадмия, представлена на кривой 1. Из графика видно, что коэффициент прохождения остается неизменным при изменении угла падения ультразвукового луча во всем исследуемом диапазоне углов, при которых образец полностью перекрывал ультразвуковой пучок. Концентрация частиц кадмия в матрице ППК составляла 35%. Такие гетерогенные системы являются сильнопоглощающими средами за счет возбуждения тепловых, вязких и рассеянных волн на включениях [6]. Экспериментально установленное в данной работе отсутствие отражения и заметного расширения при прохождении через гетерогенный слой ультразвукового луча позволяет сделать предположение о доминирующей роли диссипативных потерь, т.е. ультразвуковые волны поглощаются в слое ППК с частицами кадмия, что и обуславливает значительный эффект демпфирования. Напыление пленки ППК на гетерогенное покрyтие, как видно из графика 5, еще больше увеличило степень демпфирования, причем демпфирование изгибных колебаний пленкой ППК, нанесенной на гетерогенное покрyтие, оказалось намного эффективней, чем при непосредственном напылении ППК на кремниевую пластинку.

Таким образом, полученные результаты подтверждают теоретически предсказанный эффект просветления в тонких пластинках при возбуждении изгибных волн. Они позволяют сделать предположение, что в тонкослойных композиционных материалах доминирующее значение в формировании упругих свойств играют упругие свойства подложки, а полимерные и полимерно-металлические покрyтия определяют диссипативные процессы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольцова И.С., Михайлов И.Г. Ослабление и рассеяние ультразвуковых волн во взвесах // Акуст. журн. 1975. Т. 21. № 4. С. 568–575.
2. Брехосских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
3. Бешевков С.Н. Применение МКЭ к расчету прохождения звука через ограниченные пластины // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 2. С. 209–213.
4. Лямшев Л.И. Отражение звука тонкими пластинками и оболочками в жидкости. М.: Изд-во АН СССР, 1955.
5. Шутилов В.А. Основы физики ультразвука. Л.: Изд-во ЛГУ, 1980.
6. Кольцова И.С. Поглощение и рассеяние акустических волн в дисперсных средах // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 3. С. 510–512.

Санкт-Петербургский
государственный университет

Поступило в редакцию
28.03.91

УДК 534.26

© 1992 г. А.Д. Лапин

ОТРАЖЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ ЗВУКА НА РЕЗОНАТОРЕ В ВОЛНОВОДЕ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ СЕЧЕНИЕМ

Гармоническое звуковое поле в волноводе можно представить в виде суперпозиции нормальных мод, т.е. волн, распространяющихся в волноводе без изменения своей формы [1]. Нормальные моды ортогональны и образуют полную систему волн. На основе общих свойств нормальных мод удается установить некоторые важные закономерности распространения и рассеяния звука в волноводе без знания явных представлений этих мод. Ниже исследованы закономерности отражения и рассеяния звука на резонаторе в волноводе с произвольным сечением S .

Пусть стенки волновода характеризуются нормальной акустической проводимостью Y и пусть в цилиндрической системе координат (r, φ, z) они описываются уравнением $r = G(\varphi)$. Величина Y не зависит от осевой координаты z , $\text{Re } Y = 0$. Волновод заполнен однородной средой, плотность этой среды и скорость звука в ней равны соответственно ρ и c . К волноводу в точке $(r_0, \varphi_0, 0)$, где $r_0 = G(\varphi_0)$, присоединен резонатор Гельмгольца, размеры которого малы по сравнению с длиной волны звука. Пусть на резонатор падает гармоническое звуковое поле $p^{(0)}$. Под его воздействием резонатор возбуждается и излучает поле $p^{(1)}$. Полное поле в волноводе получим сложением полей $p^{(0)}$ и $p^{(1)}$. Исследуем структуру этого поля.