АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXV 1979 Вып. 5 | АКАДЕМИЯ НАУК СССР | Сентябрь Октябрь

Основан в 1955 г. | МОСКВА | *Выходит 6 раз в год*

УДК 534—16.1

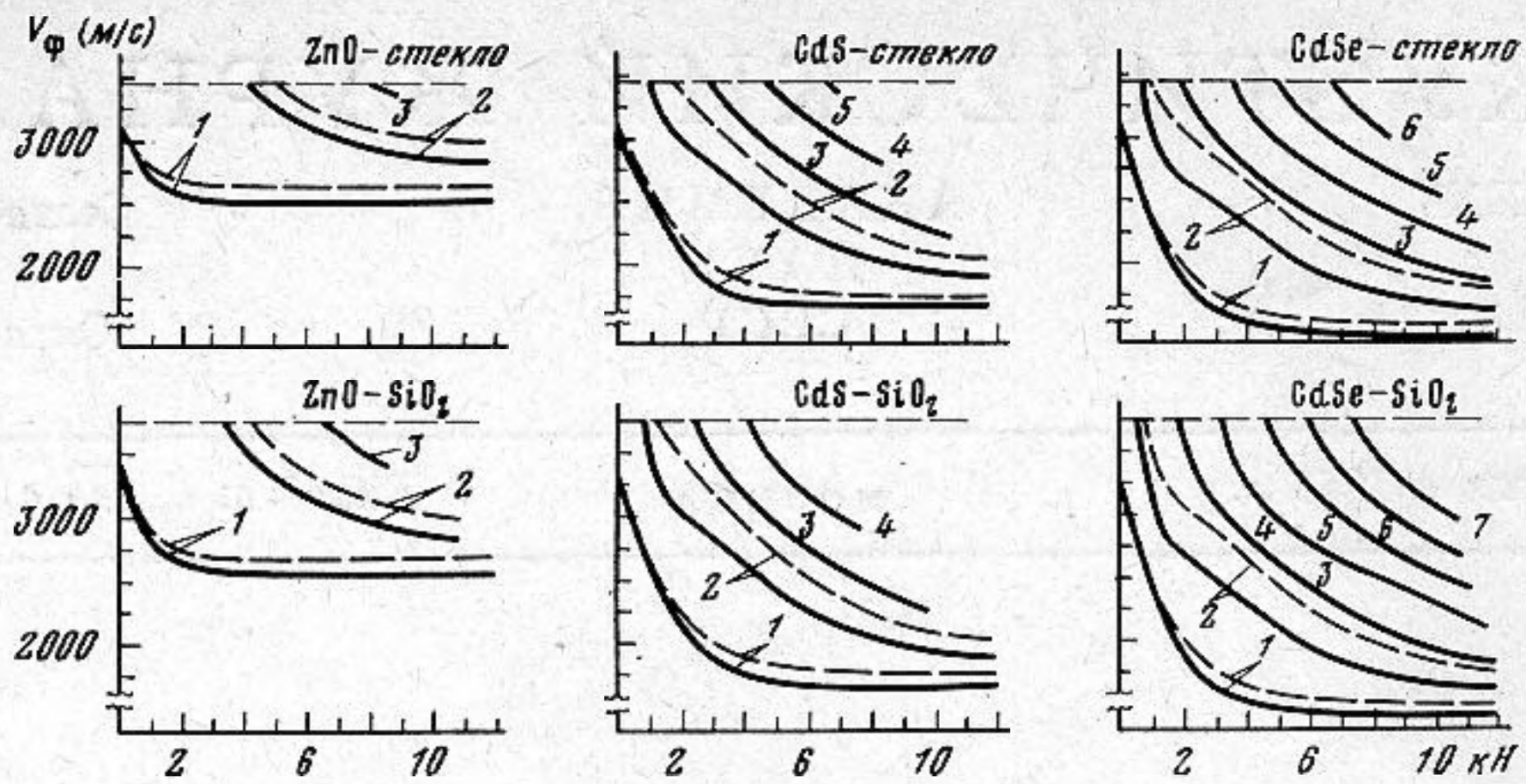
ОСОБЕННОСТИ ДИСПЕРСИИ ФАЗОВОЙ СКОРОСТИ И СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН В СЛОИСТЫХ СИСТЕМАХ

Е. В. Бауск, Ц. А. Лобанова, И. Б. Яковкин

Представлены результаты расчета дисперсии фазовой скорости, механических смещений и деформаций и полного потока энергии нормальной волны системы слой – полупространство для нескольких нормальных волн. Рассмотрены слоистые системы $ZnO-SiO_2$(пл.), $CdS-SiO_2$(пл.), $CdSe-SiO_2$(пл.), ZnO – стекло, CdS – стекло, CdSe – стекло. Для первых двух нормальных волн произведено сравнение результатов точного и приближенного расчета дисперсии фазовой скорости.

Система пленка — подложка представляет значительный интерес для акустоэлектроники. В слоистой системе возможно распространение различных типов волн: Лява, Сезавы, квазирэлеевских. В работе рассмотрен вопрос о дисперсионных свойствах слоистых систем, в которых в качестве подложки используется изотропный материал, а в качестве слоя — пьезоматериал класса $6mm$ с осью C, перпендикулярной свободной поверхности. В статье рассмотрены слоистые системы $ZnO-SiO_2$ (пл.), $CdS-SiO_2$ (пл.), $CdSe-SiO_2$ (пл.), ZnO — стекло, CdS — стекло, CdSe — стекло. В работах [1, 2] представлены результаты упрощенного расчета дисперсии фазовой скорости поверхностной акустической волны в системе слой — полупространство при условии, что и слой, и полупространство упругоизотропны. В данной работе для указанных систем проведено сравнение результатов расчета дисперсии при двух подходах: (1) — упрощенном, когда слой предполагается упругоизотропным и непьезоэлектрическим, (2) — точном, когда учтена анизотропия и пьезоэлектрические свойства полупроводникового слоя. Дисперсионные кривые такой слоистой системы представляют собой серию нормальных волн (мод). При исчезающе малых значениях толщины слоя H в сравнении с длиной звуковой волны λ в системе существует единственная волна, аналогичная рэлеевской. Эту основную моду будем называть модой 1. С увеличением толщины слоя в системе возникает волна Сезавы, или первая волноводная мода, которую будем называть модой 2. Далее с увеличением толщины слоя появляются моды 3, 4, 5 и т. д., которые являются более высокими волноводными модами, сходными

© Издательство «Наука», «Акустический журнал», 1979 г.



Фиг. 1. Дисперсия фазовой скорости в зависимости от kH для различных слоистых систем (сплошные кривые – результат приближенного счета, штриховые – результат точного счета)

по структуре либо с квазирэлеевскими волнами, либо с волнами Сезавы.

На фиг. 1 приведены сравнительные результаты дисперсии в слоистой системе при упрощенном (сплошные кривые) и точном (штриховые кривые) расчетах. Заметим, что точный расчет проведен лишь для первой и второй мод. Фигура 1 позволяет также провести сравнительный анализ дисперсионных свойств слоистых систем, имеющих один тип подложки, но различные материалы слоя (ZnO, CdS, CdSe), и одинаковый материал слоя, но различные подложки (SiO_2, стекло).

Расчеты показали, что при больших значениях kH (k – волновое число) первая мода стремится к скорости рэлеевской волны в материале слоя, все же остальные нормальные волны стремятся к скорости сдвиговой волны.

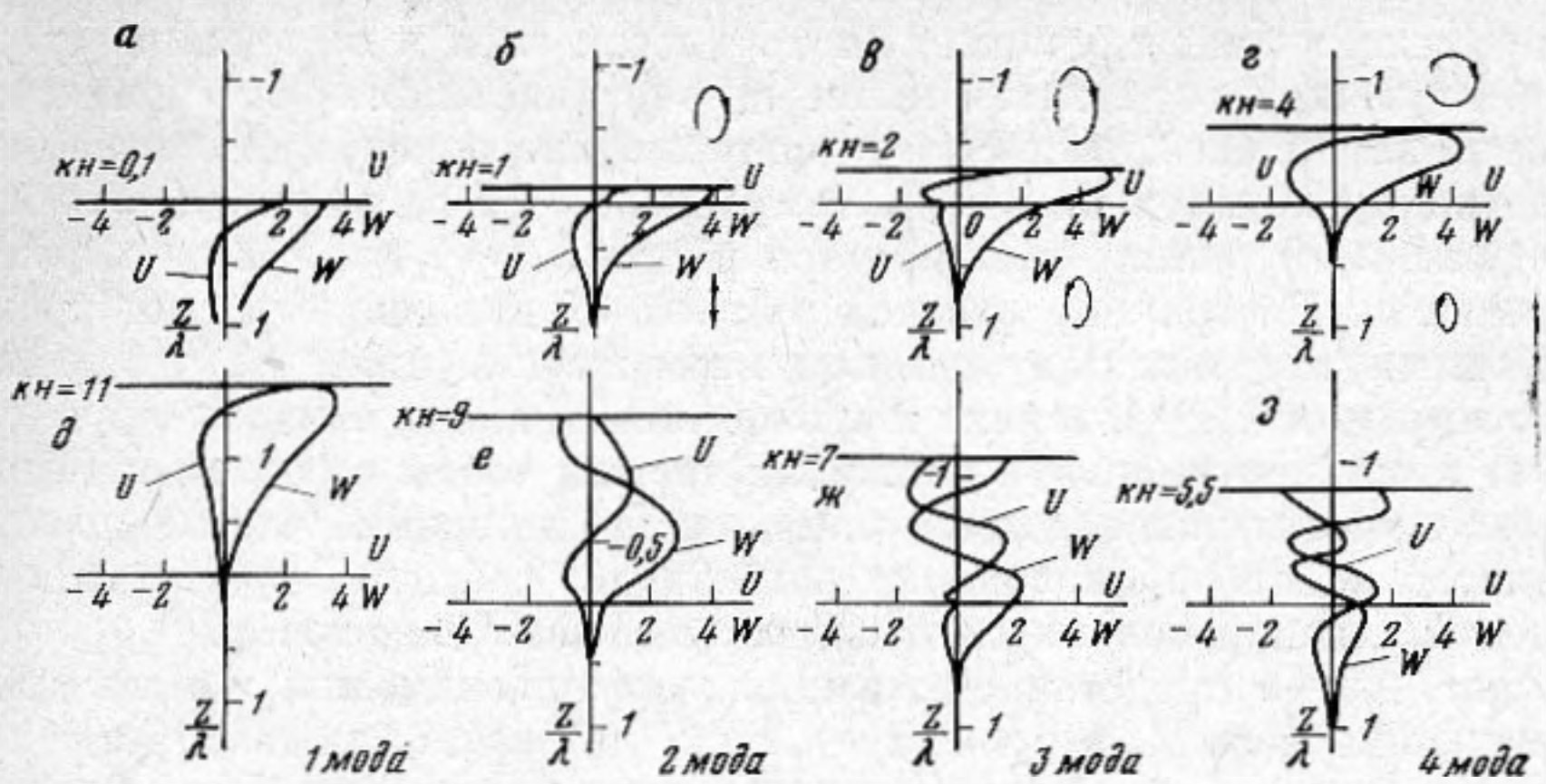
Анализируя результаты, представленные на фиг. 1, можно сделать следующие выводы.

а) Расхождение результатов приближенного и точного анализов для квазирэлеевской волны незначительно в области резкого спада кривых, и основная ошибка в расчетах связана с тем значением скорости, к которому стремится кривая при больших kH, когда влиянием полупространства можно пренебречь. В приближенном расчете скорость рэлеевских волн (v_R) в материале слоя оказывается заметно заниженной: для ZnO $v_R = 2{,}55 \cdot 10^3$ м/с вместо $2{,}72 \cdot 10^3$ м/с; для CdS $v_R = 1{,}66 \cdot 10^3$ м/с вместо $1{,}73 \cdot 10^3$ м/с.

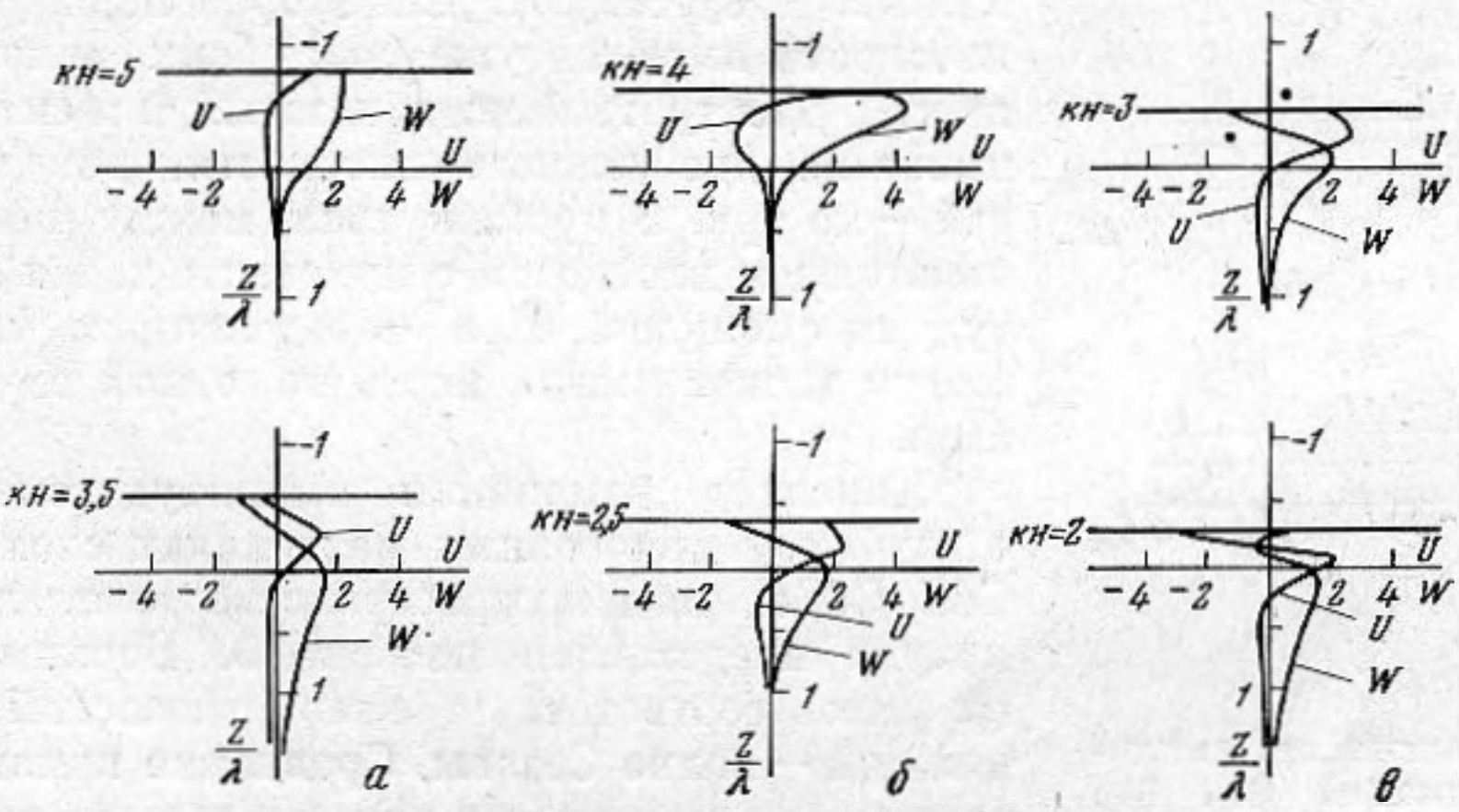
б) Расхождение результатов расчета для волны Сезавы гораздо существеннее и имеет место во всем интервале рассмотренных значений kH.

И в том, и в другом случае различие результатов связано с приближением упругой изотропии, в котором существенная роль отведена лишь модулю сдвига.

Тем не менее приближенный расчет позволяет сделать качественные выводы относительно дисперсии поверхностных акустических волн в выбранной паре материалов. Действительно, из фиг. 1 видно, что чем меньше различие в скоростях поверхностных волн слоя и полупространства, тем при больших величинах kH возникает волна Сезавы, слабее выражены дисперсионные свойства системы. Именно этот случай отражает система ZnO – стекло. Наибольшее различие скоростей присуще системе CdSe–SiO_2. В этом случае соседние ветви дисперсионных кривых близки друг к другу, дисперсия значительна, и в области $kH \approx 2$ наблюдается заметный излом кривой *2*.



Фиг. 2. Зависимость амплитуд механических смещений от глубины в системе $CdS-SiO_2$. Верхние эллипсы на фиг. 2, *б*, *в*, *г* характеризуют движение частиц на свободной границе пленки, нижние — на границе раздела сред



Фиг. 3. Характер изменения амплитуд механических смещений с глубиной для различных материалов слоя: ZnO (*а*), CdS (*б*) и CdSe (*в*) на полупространстве SiO_2. Верхние кривые соответствуют первой моде, нижние — второй

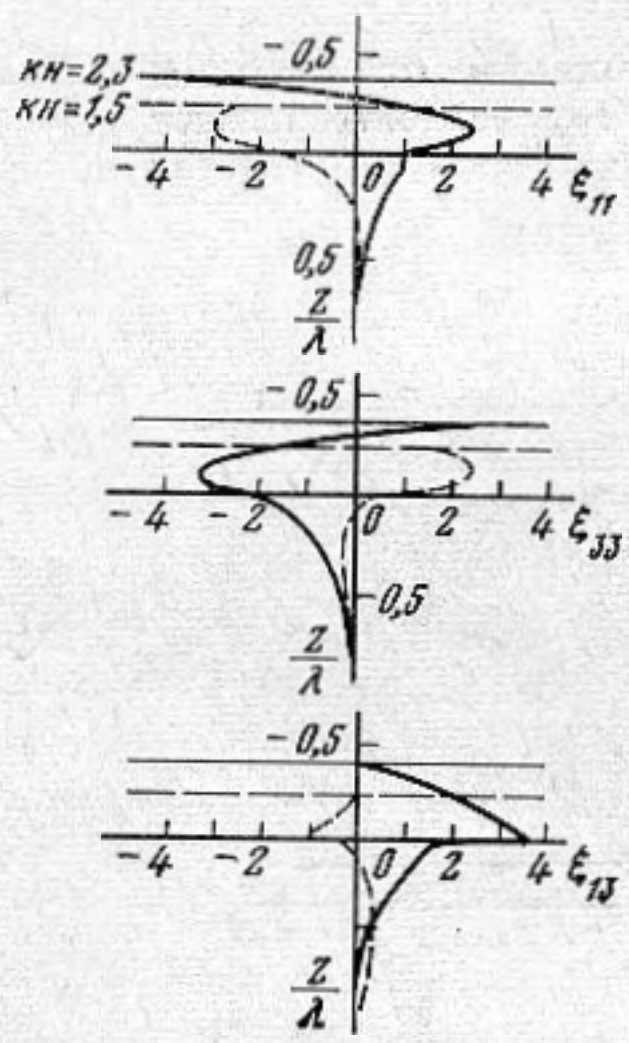
Рассмотрим структуру поверхностных волн в слоистых системах. На фиг. 2, *а—д* приведены зависимости амплитуд механических смещений в системе $CdS-SiO_2$ от глубины для первой моды при возрастающих значениях kH (0,1; 1; 2; 4; 11). Ось абсцисс представляет собой границу раздела двух сред, U — амплитуду смещений вдоль оси x_1, т. е. вдоль направления распространения волны, W — амплитуду смещений вдоль оси x_3, т. е. в глубь полупространства.

Отметим, что амплитуды смещений нормированы на корень квадратный из потока энергии нормальной волны в системе. Это обусловлено тем, что они найдены при решении упругой задачи с точностью до постоянного множителя, который в свою очередь зависит от kH. Полный поток энергии нормальной волны в системе слой — полупространство найден с точностью до квадрата того же множителя. Расчет показывает, что изменение этой величины в интервале $0<kH<6$ составляет более двух порядков.

Характер спадания амплитуд смещений с глубиной при малых kH (фиг. 2, *а*) аналогичен спаданию смещений рэлеевской волны в материале подложки. Для больших kH (фиг. 2, *д*) он аналогичен характеру спадания смещений рэлеевской волны в материале слоя.

В промежуточных случаях на поверхности слоя и на границе сред соотношение между горизонтальными и вертикальными смещениями существенно изменяется. Для $kH=1$ (фиг. 2, *б*) на поверхности слоя движение частиц происходит по вытянутому вдоль оси x_3 эллипсу, затем при $kH=2$ (фиг. 2, *в*) эллипс расширяется и при $kH=4$ (фиг. 2, *г*) переходит в окружность. На границе раздела при $kH\leqslant 1$ движение частиц происходит по вытянутому вдоль x_3 эллипсу в том же направлении, что и на поверхности, а при $kH=1$ эллипс вырождается в прямую вдоль x_3, т. е. существует лишь вертикальное движение частиц; затем с ростом kH движение снова эллиптическое, однако направление движения частиц по эллипсу меняется на противоположное. Амплитуды смещений убывают с увеличением kH, и при больших kH эллипс стягивается в точку.

На фиг. 2, *д—з* представлены амплитуды механических смещений, соответствующие первой, второй, третьей и четвертой модам. Как видно, распределение смещений по глубине резко различается для разных нормальных волн. Для первой моды плоскость максимальных амплитуд близка к поверхности и существует лишь одна узловая плоскость, в которой смещения вдоль x_1 отсутствуют. Для второй моды узловые плоскости имеются уже для обоих типов смещений. Для третьей моды каждый тип смещений имеет по две узловые плоскости, для четвертой — по три. В промежутках между ними располагаются плоскости с максимальными амплитудами смещений. При определенных kH максимум может иметь место на одной из границ слоя.



Фиг. 4. Зависимость амплитуд деформаций ξ_{11}, ξ_{33}, ξ_{13} (в относительных единицах) от глубины для системы $CdS-SiO_2$ (сплошные кривые — первая мода, штриховые — вторая)

Характер изменения амплитуд смещений с глубиной при разных материалах слоя (ZnO, CdS, CdSe) на полупространстве из плавленого кварца представлен на фиг. 3. Верхний ряд графиков соответствует квазирэлеевской волне, нижний — волне Сезавы. Сравнение кривых для разных пар материалов показывает, что системы с малым различием скоростей граничащих сред имеют более плавный характер изменения смещений с глубиной; это характерно, например, для системы $ZnO-SiO_2$. При резко различающихся скоростях (система $CdSe-SiO_2$) изменения с глубиной также более резки.

Для всех трех систем характерен тот факт, что в слое одноименные смещения для первой и второй мод противофазны. Еще более четко противофазность мод видна на фиг. 4, где для системы $CdS-SiO_2$ представлены зависимости амплитуд деформаций ξ_{11}, ξ_{33} и ξ_{13} от глубины (для первой моды — сплошные кривые, для второй моды — штриховые). Амплитуды деформаций также нормированы на корень квадратный из потока энергии нормальной волны. Отметим, что деформации ξ_{33} и ξ_{13} испытывают значительные скачки на границе сред.

Все численные результаты получены с использованием констант материалов c_{ijkl}, e_{ijk}, ε_{ij}, заимствованных из [3, 4] для CdS, CdSe и ZnO. Значения плотностей для CdS, CdSe и ZnO соответственно составляли 4819, 5684 и 5675 кг/м^3. Константы для плавленого кварца и стекла (К-8) приведены в таблице. Упругие модули стекла К-8 получены нами из измерений скорости фазоинтерференционным методом.

Таким образом, приведенные расчеты показывают, что дисперсия фазовой скорости для квазирэлеевской волны может быть с хорошей степенью точности описана в приближении изотропной и непьезоэлектриче-

Материал	ρ, кг/м^3	c_{11}, н/м^2	c_{55}, н/м^2	c_{13}, н/м^2
SiO_2 (пл.)	2200	$7{,}836\cdot10^{10}$	$3{,}117\cdot10^{10}$	$1{,}602\cdot10^{10}$
Стекло (К-8)	2520	$8{,}635\cdot10^{10}$	$3{,}045\cdot10^{10}$	$2{,}546\cdot10^{10}$

ской пленки в широком интервале значений kH, кроме области kH, где влиянием подложки можно пренебречь. В этой области значения фазовой скорости оказываются заметно заниженными.

Для волны Сезавы приближенный расчет уже вносит значительную ошибку во всей области изменений kH.

Авторы благодарят А. Л. Белостоцкого за полезные дискуссии и помощь при составлении машинных программ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sezawa K., Kanai K.* Discontinuity in the dispersion curves of Rayleigh waves. Bull. Earthquake Res. Institute University of Tokyo, 1935, *13*, part 2, 237–244.
2. *Kanai K.* On the M_2– waves (Sezawa – waves). Bull. Earthquake Res. Institute University of Tokyo, 1951, *29*, part 1, 39–48.
3. *Berlincourt D., Jaffe H., Shiozawa L. R.* Electroelastic properties of the sulfides, selenides and tellurides of zinc and cadmium. Phys. Rev., 1963, *129*, 3, 1009–1017.
4. *Hutson A. R.* Piezoelectricity and conductivity in ZnO and CdS. Phys. Rev., 1960, *4*, 10, 505–507.

Институт физики полупроводников
СО Академии наук СССР

Поступила
11 декабря 1978 г.