

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ СЕЗАВА В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ ПЛЕНОК

Анисимкин В. И., Котелянский И. М., Мавленков П. Н.

Цель настоящей работы состояла в теоретическом исследовании свойств второй акустической моды рэлеевского типа (волны Сезава) в твердотельной слоистой структуре. В работе рассчитывается величина предельной толщины пленки  $h$ , нормированной на длину акустической волны  $\lambda_a$  (так называемое  $h/\lambda_a$  — «отсечки»), при которой волна Сезава возникает как чисто поверхностная акустическая волна (ПАВ) в зависимости от соотношения физических параметров пленки и подложки. Эта зависимость необходима для целенаправленного выбора материалов и толщины пьезоэлектрической пленки при создании акустоэлектронных устройств на основе слоистых структур. Кроме того, на примере слоистых структур с пленками AlN, ZnO, CdS, SiO<sub>2</sub>, на подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si, GaAs, алюмоиттриевого граната и плавяного кварца проанализировано, как изменяется структура механических смещений и степень локализации энергии волны Сезава в пленке в зависимости от ее нормированной толщины  $h/\lambda_a$ . Проведено сравнение полученных результатов с данными для первой акустической моды рэлеевского типа (волны Рэлея) в тех же слоистых структурах.

Расчет производился в предположении изотропности упругих свойств материалов пленки и подложки. Возможность такого приближения оправдана тем, что для пьезопленок гексагональной сингонии AlN, ZnO, CdS плоскостью распространения ПАВ служит, как правило, акустически изотропная плоскость (0001). Подложки, обычно, выбираются из изотропных, либо слабо анизотропных (Si, GaAs, алюмоиттриевый гранат) материалов. В расчетах пренебрегалось влиянием пьезоэффекта пленок, так как увеличение упругих модулей, обусловленное пьезоэффектом, мало (порядка нескольких процентов) и практически компенсируется их уменьшением при переходе от монокристалла к пленке того же материала. Упругие модули и плотность материалов рассчитывались по методике [1] из параметров монокристаллов [2]. Далее коэффициенты Ламе  $\lambda$ ,  $\mu$  и плотность  $\rho$ , относящиеся к пленкам, будут отмечаться значком « $\wedge$ ».

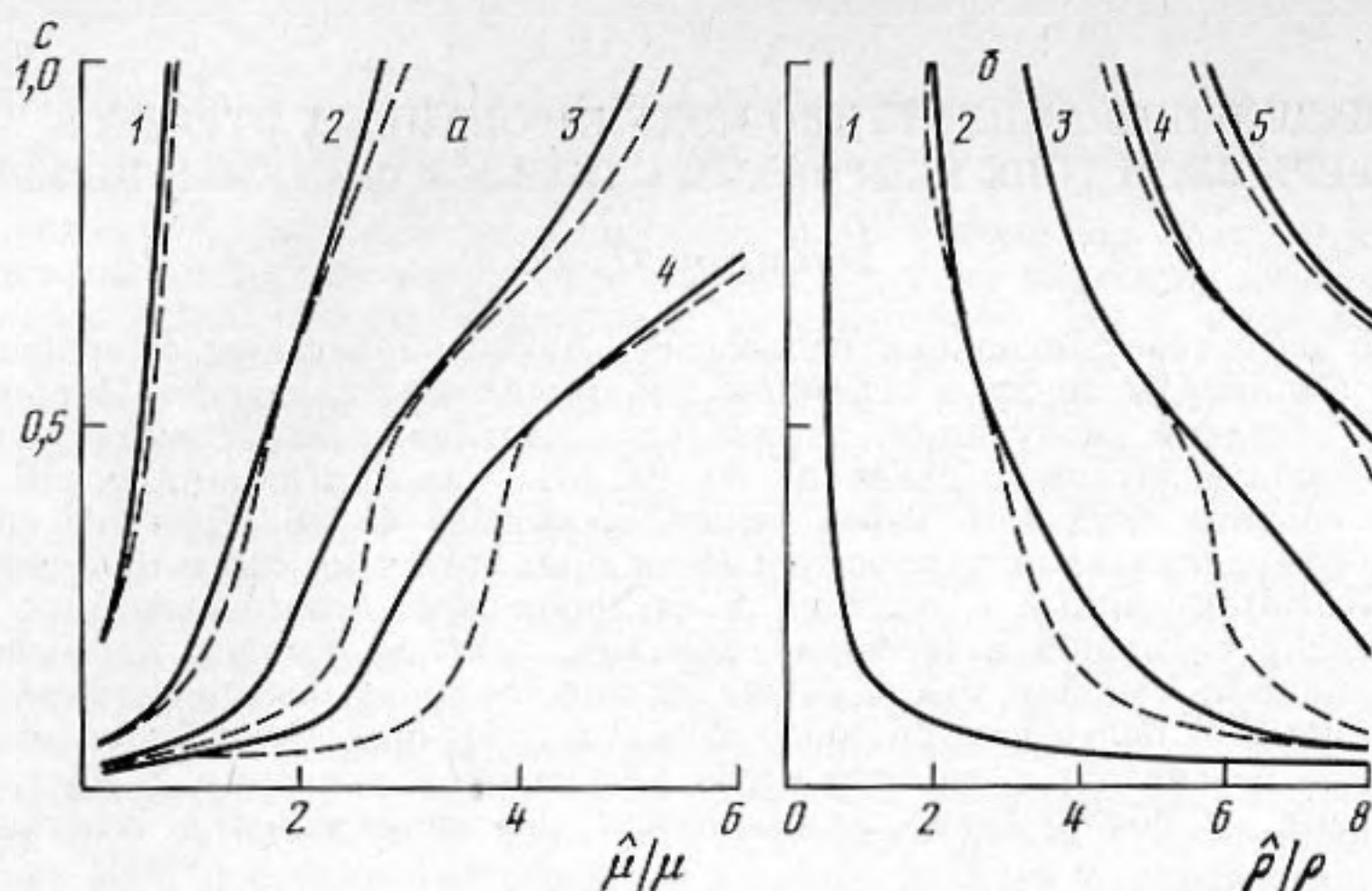
Расчет скорости волн осуществлялся методом векторного и скалярного потенциалов [3, 4]. Определение величины  $h/\lambda_a$  — «отсечки» проводилось минимизацией детерминанта матрицы граничных условий путем вариации соотношения  $h/\lambda_a$  при значении скорости, равном скорости поперечной волны в материале подложки. Расчет относительной доли энергии волны  $r$ , сконцентрированной в пленке, при каждом  $h/\lambda_a$  выполнялся интегрированием потока энергии до глубины, на которой энергия волны составляла 0,1% от ее величины на поверхности пленки.

Зависимость предельной нормированной толщины пленки, при которой волна Сезава возникает как чисто поверхностная волна, от акустических параметров материалов слоистой структуры представлена на фиг. 1. Расчет показал, что величина  $h/\lambda_a$  — «отсечки» определяется не абсолютными, а относительными значениями упругих коэффициентов Ламе  $\hat{\lambda}/\lambda$ ,  $\hat{\mu}/\mu$  и плотностей  $\hat{\rho}/\rho$  пленки и подложки. При этом отношение  $\hat{\lambda}/\lambda$  имеет локальное и сравнительно слабое влияние, тогда как отношение  $\hat{\mu}/\mu$  приводит к росту, а отношение  $\hat{\rho}/\rho$  — к снижению значения  $h/\lambda_a$  — «отсечки». Используемый нами диапазон изменения упругих коэффициентов Ламе и плотностей охватывал практически все твердотельные слоистые структуры.

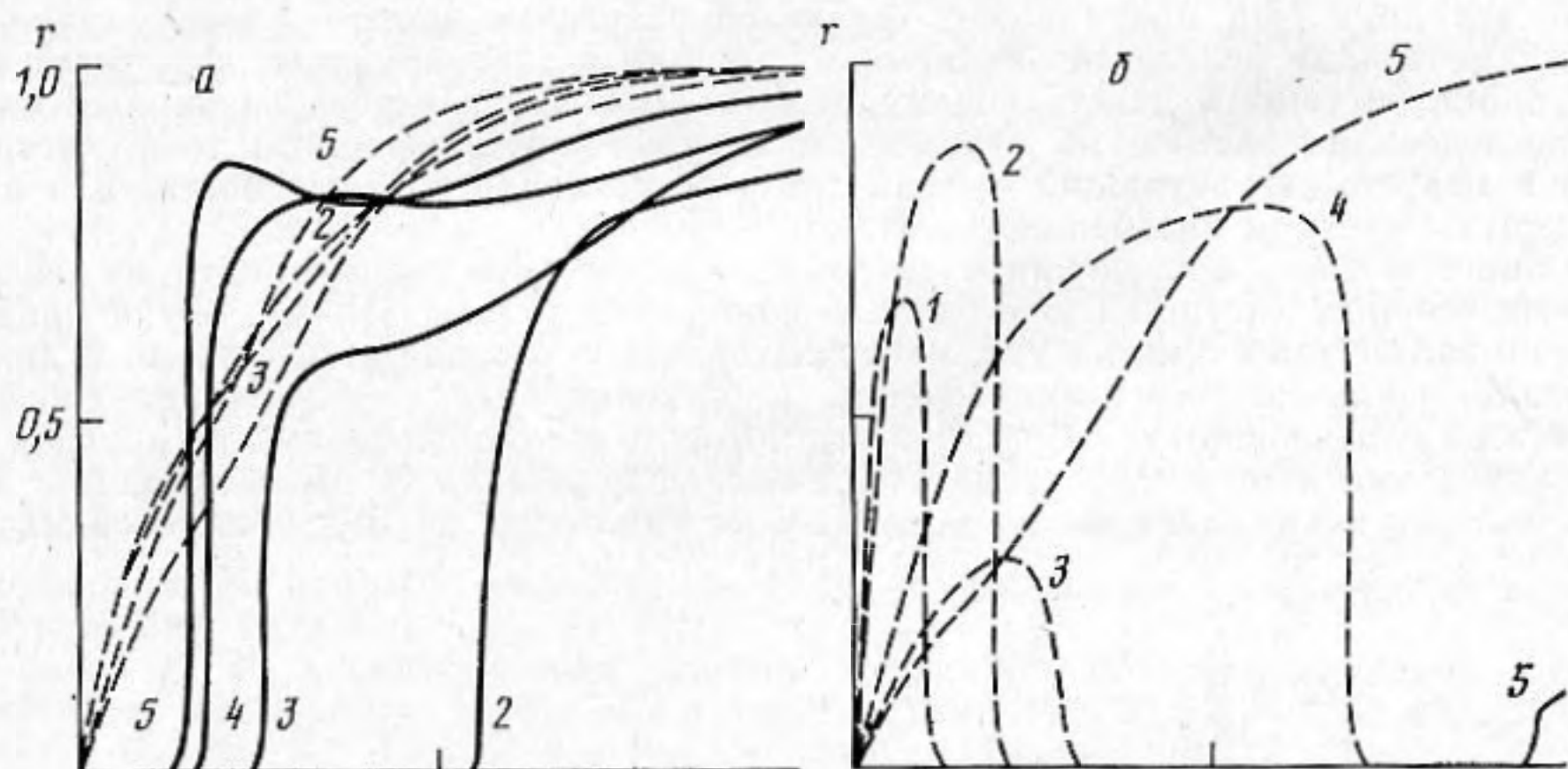
Структура «утекающей» волны Сезава, как и других типов «утекающих» акустических волн, характеризуется отсутствием локализации упругой энергии в приповерхностном слое и ее переизлучением в объем структуры. Эллипс механических смещений при удалении от поверхности постоянно и сложным образом меняет свою форму, а, начиная с глубины порядка нескольких  $\lambda_a$ , вырождается в линию, в дальнейшем не меняясь. При малых  $h/\lambda_a$  в «утекающей» волне Сезава преобладает продольная составляющая механического смещения. С ростом  $h/\lambda_a$  вклад этой составляющей уменьшается, а поперечной возрастает.

На фиг. 2, а для слоистых структур с «замедляющими» пленками ZnO представлена зависимость относительной доли энергии волны  $r$ , сконцентрированной в пленке, от величины отношения  $h/\lambda_a$ . Для других «замедляющих» структур эта зависимость величины  $r$ , характеризующей степень локализации ПАВ в пленке, была аналогичной. Для ПАВ Рэлея величина  $r$  монотонно возрастает от 0 до  $\approx 1$ , мало меняясь при изменении материала подложки. Для волны Сезава, напротив, зависимость  $r$  от материала подложки более сильная, а зависимость от  $h/\lambda_a$  имеет три характерные области. Для  $h/\lambda_a$ , меньших «отсечки», «утекающий» характер волны приводит к растеканию ее энергии в подложку, и значение  $r$  близко к нулю. При переходе в район существования ПАВ глубина локализации уменьшается примерно до  $2\lambda_a$ , и величина  $r$  существенно увеличивается. Дальнейшее увеличение  $h/\lambda_a$  приводит к медленному и не всегда монотонному увеличению  $r$ .

На фиг. 2, б зависимость  $r$  от  $h/\lambda_a$  приведена для структур с пленками AlN. Поскольку скорость волн в AlN велика, эта пленка является «замедляющей» только для подложки из сапфира. Для остальных подложек она «ускоряет» ПАВ, обеспечивая существование только волны Рэлея. Распределение энергии этой волны по глубине «ускоряющей» структуры отличается от такового для «замедляющих»



Фиг. 1. Зависимость от акустических параметров материалов пленки и подложки предельной нормированной толщины пленки, при которой волна Сезава возникает как чисто поверхностная волна ( $c=h/\lambda_a$  — «отсеки»). Сплошная линия —  $\lambda/\lambda_a=5,0$ , пунктир —  $\lambda/\lambda_a=0,2$ ;  $a$  — отношение плотностей  $\hat{\rho}/\rho$ : 1 — 0,8; 2 — 3,2; 3 — 5,6; 4 — 8,0; 6 — отношение модулей сдвига  $\hat{\mu}/\mu$ : 1 — 0,2; 2 — 1,4; 3 — 2,6; 4 — 3,8; 5 — 5,0



Фиг. 2. Зависимость относительной доли энергии ПАВ в пленке  $\gamma$  от нормированной толщины пленки  $h/\lambda_a$ . Подложки: 1 — GaAs, 2 — плавленный кварц, 3 — алумоиттриевый гранат, 4 — Si, 5 —  $Al_2O_3$ . Сплошная линия — волна Сезава, пунктир — волна Рэлея:  $a$  — пленка ZnO (1 — не приводится);  $b$  — пленка AlN

структур: вместо монотонного увеличения происходит быстрый рост, а затем спад  $\gamma$  практически до нуля. Уменьшение степени локализации волны Рэлея в пленке совпадает с ее преобразованием в волну «утечки», основная энергия которой сконцентрирована в подложке.

Примечательно, что волны «утечки» существуют как в «замедляющих», так и в «ускоряющих» слоистых структурах. При этом в «ускоряющих» структурах — это «утекающие» волны Рэлея с «отсечкой» справа (при больших  $h/\lambda_a$ ), а в «замедляющих» структурах — это «утекающие» волны Сезава с «отсечкой» слева (при малых  $h/\lambda_a$ ). При сближении упругих модулей и плотностей материалов пленки и подложки в обоих типах слоистых структур вырождение ПАВ Рэлея и Сезава в волны «утечки» сдвигается в область более толстых пленок (см. фиг. 1, 2).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Физическая акустика/Под ред. Мезона У. Т. 3. Ч. Б. М.: Мир, 1968.
2. Auld B. A. Acoustic fields and waves in solids/Ed. Ithon Wiley & Sons. 1973. V. 2. P. 423.
3. Ляв А. Математическая теория упругости. М. Л.: ОНТИ, 1935. 674 с.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. М.: Наука, 1965. 202 с.

Институт радиотехники и электроники  
Академии наук СССР

Поступило в редакцию  
16.IV.1987