

4. Базарон У.Б., Дерягин Б.В., Будаев О.Р., Бадмаев Б.Б. Определение низкочастотного комплексного модуля сдвига жидкостей по измерениям длины сдвиговых волн // Докл. АН СССР. – 1978. – Т.238, №1. – С. 50-53.
5. Бадмаев Б.Б., Будаев О.Р., Дембелова Т.С. Распространение сдвиговых волн в полимерных жидкостях // Акуст. журн. – 1999. – Т.45, №5. – С. 610-614.
6. Бадмаев Б.Б., Занданова К.Т., Будаев О.Р. и др. Низкочастотный комплексный модуль сдвига воды, этиленгликоля и триэтиленгликоля // Докл. АН СССР. – 1980. – Т.254, №2. – С. 381-385.
7. Barnakov Yu.A., Veal I., Kabato Z. and oth. Simple route to Nd:YAG transparent ceramics // Proceedings of SPIE. – 2006. – V.6216. – art. №62160Z.

Дембелова Туяна Сергеевна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, отдел физических проблем, Бурятский научный центр СО РАН. 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8, e-mail: [lmf@pres.bscnet.ru](mailto:lmf@pres.bscnet.ru)

Цыренжапова Антонино Батоевна, аспирант, отдел физических проблем, Бурятский научный центр СО РАН. 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8, e-mail: [lmf@pres.bscnet.ru](mailto:lmf@pres.bscnet.ru)

Цыремжитова Анжелика Александровна, аспирант, отдел физических проблем, Бурятский научный центр СО РАН. 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8

Dembelova Tuyana Sergeevna, candidate of engineering, leading researcher, department of physical problems, Buryat Scientific Center SB RAS.

Tsyrenzhapova Antonina Batoevna, postgraduate student, department of physical problems, Buryat Scientific Center SB RAS.

Tsyremzhitova Anzhelika Alexandrovna, postgraduate student, department of physical problems, Buryat Scientific Center SB RAS.

УДК 534.6 + 532.13

## РЕГИСТРАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ АМПЛИТУДЫ И СКОРОСТИ РЭЛЕЕВСКИХ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКА

И.Г. Симаков, Ч.Ж. Гулгенов

*Разработан чувствительный метод регистрации изменения скорости и затухания поверхностных акустических волн в слоистой системе. Результаты исследования могут быть использованы для разработки чувствительных адсорбционных датчиков.*

Ключевые слова: *поверхностные акустические волны, измерение скорости, измерение амплитуды, поверхностные процессы.*

### REGISTRATION OF AMPLITUDE AND VELOCITY OF RAYLEIGH WAVES CHANGES ON THE PIEZOELECTRIC SURFACE

I.G. Simakov, Ch.Zh. Gulgenov

*The sensitive method of registration changes of velocity and superficial ultrasonic waves signal attenuation in schistose system is developed. Results of the research can be used for adsorption data units working out.*

Keywords: *surface acoustic waves, velocity measuring, amplitude measuring, surface phenomena.*

Поверхностные акустические волны (ПАВ) рэлеевского типа успешно используются для исследования различных явлений и процессов на поверхности твердого тела [1–3]. Поверхностные процессы сопровождаются уменьшением свободной энергии, изменением упругих характеристик приповерхностного слоя твердого тела, что приводит к изменению условий распространения поверхностной волны. Изменения упругих характеристик приповерхностного слоя в акустических измерениях проявляются как малые изменения амплитуды и скорости упругих поверхностных волн [4]. Поэтому рэлеевские волны могут быть использованы в качестве инструмента исследования поверхностных процессов. Для анализа особенностей поверхностных процессов необходимы чувствительные методы регистрации затухания и изменения скорости ПАВ. В настоящей работе представлен метод регистрации малых изменений амплитуды и скорости ПАВ.

Типичным поверхностным процессом является адсорбция пара полярной жидкости. Адсорбционный слой полярной жидкости формируется как результат динамического равновесия двух одновременно идущих процессов: полислойной адсорбции молекул жидкости на твердой поверхности и десорбции этих молекул с поверхности слоя [5]. Толщина слоя не превышает нескольких десятков нанометров и зависит от давления пара у поверхности твердого тела (адсорбента) и температуры адсорбирующей поверхности. Изменения упругих характеристик адсорбирующей поверхности твердо-

го тела, затухания и скорости ПАВ на начальном этапе формирования адсорбционного слоя малы. Следовательно, для изучения процесс адсорбции можно использовать рэлеевские волны.

Наиболее эффективным и распространенным устройством для возбуждения и приема ПАВ является встречно-штыревой преобразователь (ВШП) [6]. В наиболее простом виде он представляет собой совокупность параллельных металлических электродов, имеющих периодическую пространственную структуру и размещенных на оптически полированной поверхности пьезоэлектрической подложки (рис. 1). Обычно ВШП имеет две контактные площадки, которые объединяют две группы электродов. При подаче на вход переменного электрического напряжения в материале подложки индуцируются электрические поля, которые за счет обратного пьезоэлектрического эффекта создают в ней механические напряжения, изменяющиеся с частотой входного электрического сигнала. На каждом электроде электрическое поле меняет знак, и поэтому на частотах, соответствующих условию равенства длины периода решетки  $d$  нечетному числу длин волн, излучаются ПАВ. Направление распространения прямых и обратных ПАВ перпендикулярно длине электродов (рис. 1б). Если скорость ПАВ для конкретного пьезоэлектрического материала обозначить через  $V$ , то частоты упругого резонанса будут равны  $(2n-1)V/\lambda$ , где  $n$  – целое число.

Прием ПАВ осуществляется вторым преобразователем, с помощью которого упругие напряжения благодаря прямому пьезоэлектрическому эффекту преобразуются в переменное электрическое напряжение. Встречно-штыревой преобразователь излучает не только ПАВ, но и является источником объемных волн, распространяющихся в толще материала, т.е. имеет место непрерывное и не зависящее от угла излучение на всех частотах. В результате этого происходит частичное преобразование электрической энергии в объемные волны на основной частоте ПАВ. Возбуждение, кроме ПАВ, также и объемных волн, приводит к потерям. Объемные волны могут интерферировать с ПАВ, что может явиться причиной искажения выходного сигнала. Кроме того, нежелательные сигналы могут возникать в результате отражений объемных волн от нижней поверхности подложки, а также отражений поверхностных и объемных волн от её торцевых граней. Во многих случаях паразитные составляющие, искажающие выходной сигнал, можно подавить. Два преобразователя ПАВ (один для возбуждения и один для приема поверхностных акустических волн), сформированных на поверхности звукопровода, представляют собой простейший прибор – линию задержки.

Звукопровод линии задержки обычно представляет собой пластину из пьезоэлектрического кристалла толщиной около 1 мм. Электрический сигнал, приложенный к входному преобразователю, преобразуется в упругую поверхностную волну. В результате на приемном преобразователе появляется сигнал, задержанный на время, определяемое расстоянием между преобразователями и скоростью распространения ПАВ. Типичное время задержки составляет десятки микросекунд.

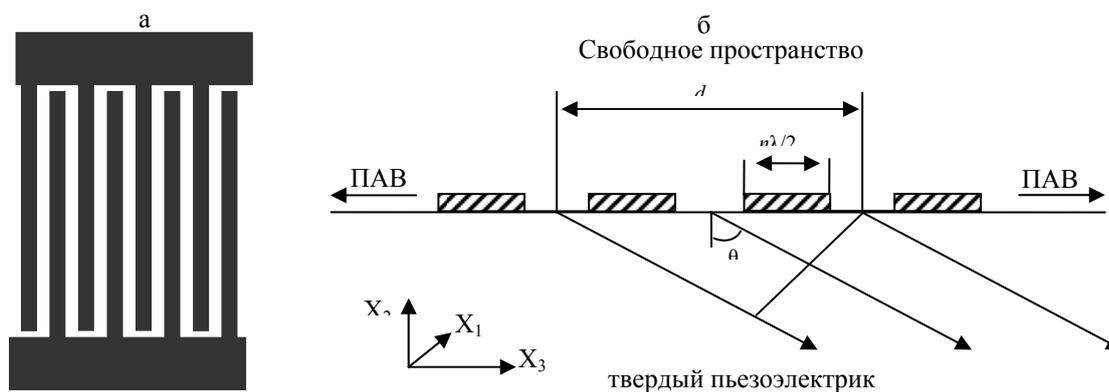


Рис. 1. Размещение электродов ВШП на поверхности пьезоэлектрика (а, б) и направления координатных осей (б)

Ранее был предложен метод измерения малых затуханий и изменений скорости ультразвуковых поверхностных волн [7], основанный на интерференции акустических сигналов, возбуждаемых двумя ВШП и регистрируемых третьим преобразователем, идентичным двум первым. Особенностью метода является то, что интерференция происходит в акустическом тракте линии задержки. При практической реализации метода возникают некоторые трудности, в частности, сложно изготовить иден-

тичные преобразователи и добиться равенства амплитуд интерферирующих сигналов. Эти трудности устраняются в предложенном ниже методе.

Для регистрации малых возмущений затухания и скорости ПАВ нами предложен метод, основанный на интерференции входного и задержанного электрических сигналов (рис. 2). На излучающий преобразователь 1' подается сигнал с выхода генератора высокой частоты 1. Задержанный сигнал с приемного преобразователя 2' передается на вход усилителя 2. Одновременно на вход усилителя подается сигнал, ослабленный аттенуатором до амплитуды задержанного сигнала. Суммарный сигнал, пройдя усилитель 3, попадает на вход осциллографа или другого регистрирующего устройства 4 (рис. 2). В результате интерференции величина суммарного сигнала зависит как от соотношения фаз прямого и задержанного сигналов, так и соотношения их амплитуд. Баланс амплитуд достигается регулировкой аттенуатора, а баланс фаз – перестройкой частоты генератора. Генератор настраивается на частоту интерференционного максимума или минимума. Однако более предпочтительной является настройка на интерференционный минимум, так как изменение амплитуды результирующего сигнала на частоте интерференционного минимума является наибольшим. Для гармонических интерферирующих сигналов и суммарного сигнала можно записать следующие выражения  $U_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$ ,  $U_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$ ,  $U^2(k, x) = A_1^2(k) + A_2^2(k) + 2A_1(k) \cdot A_2(k) \cos\varphi$ , где  $\varphi = kl = 2\pi f l / V$ .

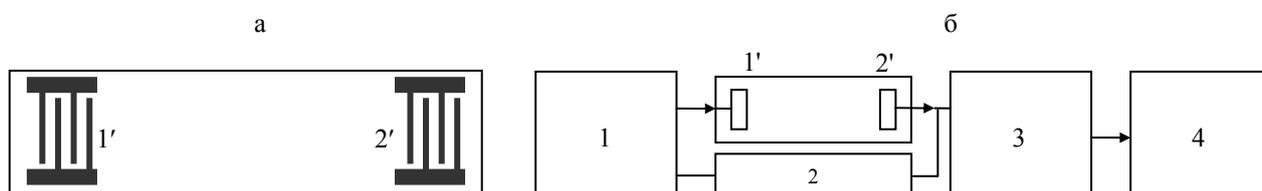


Рис. 2. Линия задержки (а) и блок-схема установки (б) для измерения малых изменений затухания и скорости поверхностных акустических волн

Можно показать, что при кратном половине длины волны расстоянии между преобразователями  $l = \lambda + \lambda/2$  и равенстве амплитуд  $A_1(k) = A_2(k) = A_0(k)$ , следовательно,  $U_1(k, x) + U_2(k, x) = 0$ . Любое изменение состояния поверхности и приповерхностной области твердого тела приведет к изменению условий распространения ПАВ, появлению сигнала на приемном преобразователе и соответственно к увеличению выходного сигнала, фиксируемого регистрирующим устройством. Причиной изменения условий распространения волн может стать возмущение состояния поверхности в результате адсорбции, осаждения тонких пленок, изменения давления или температуры окружающей газовой среды и т.д. Сигнал, который регистрирует прибор, будет следствием изменения фазы или амплитуды одной из взаимодействующих волн либо результатом одновременного изменения обеих величин.

Предположим, что фаза одной из взаимодействующих волн изменилась на  $\Delta\varphi$ , а амплитуда смещений осталась без изменения. Величина выходного сигнала, идущего на усилитель 3, будет

$$U_3(k, x) = U_0(k, x) \sqrt{2[1 + \cos(2\pi f l / V)]}.$$

В этом случае величина сигнала на приемном преобразователе зависит от частоты, скорости распространения ПАВ и расстояния между центрами встречно-штыревых преобразователей. При постоянных  $l$  и  $V$  соответственно имеем

$$\Delta V / V = \Delta f / f, (l = \text{const}) \text{ и } \Delta l / l = -\Delta f / f, (V = \text{const}).$$

Перестраивая частоту генератора на  $\Delta f$ , можно скомпенсировать изменение фазы, которое произошло в излучающей системе, и снова получить минимальное значение выходного сигнала. Величина изменения частоты однозначно определяет изменение скорости  $\Delta V$  ПАВ либо изменение линейных размеров звукопровода  $\Delta l / l$ . Предположим теперь, что при распространении волн от ВШП 1' до ВШП 2' изменения фазового сдвига не произошло ( $\varphi = n\pi$ ), а их амплитуда уменьшилась на  $\Delta A(k)$ , т.е.  $A_2(k) = A_1(k) + \Delta A(k)$ . При этих условиях из уравнения выходного сигнала следует, что сигнал, на входе усилителя 3, определяется только разностью амплитуд  $U_3 \sim A_2(k) - A_1(k)$ , т.е. изменением затухания первой волны по сравнению с опорным сигналом.

Под влиянием меняющихся условий распространения акустических волн по поверхности подложки в общем случае происходит одновременное изменение амплитуды и фазы одной из взаимодействующих волн. Суммарный сигнал, который появляется на усилителе, обусловлен обоими причинами.

Для разделения сигнала на составляющие необходимо использовать различную степень их зависимости от частоты генератора. Перестраивая частоту генератора на  $\Delta f$  можно выделить и скомпенсировать ту часть выходного сигнала, которая вызвана изменением фазы  $\Delta \varphi$ . Затухание определяется по величине остаточного сигнала, который уравнивается аттенуатором. Величина изменения затухания определяется по шкале аттенуатора. Для определения изменения скорости и затухания ПАВ генератор высокой частоты необходимо настроить на частоту интерференционного минимума  $f_0$ , частота которого измеряется частотомером Ч 3-57 (на схеме рис. 2 не указан). При изменении условий распространения волн, следовательно, и скорости ПАВ, частота интерференционного минимума меняется. Её новое значение регистрируется частотомером. Изменение скорости ПАВ определяется из условия  $\Delta V/V = \Delta f/f$ .

При реализации этого метода измерения возможно снижение чувствительности в результате влияния паразитных сигналов. Влияние основных паразитных сигналов можно устранить, проводя измерения в импульсном режиме. Основное отличие импульсного интерференционного метода заключается в следующем: на излучающие преобразователи подается радиоимпульс, сформированный из сигнала, вырабатываемого генератором непрерывных колебаний; длительность радиоимпульса  $\tau$  выбирается из условия  $\tau = 2l/V$ ; вход усилителя отпирается электронным ключом на время, в течение которого взаимодействуют интерферирующие сигналы; ключи (формирующий радиоимпульс и отпирающий вход усилителя) управляются импульсным генератором с независимой регулировкой длительности и времени задержки импульсов (он же синхронизирует запуск осциллографа); длительность отпирающего усилителя импульса выбирается равной времени задержки ПАВ, распространяющихся между преобразователями.

Таким образом, входа усилителя достигает только очищенный от паразитных составляющих сигнал с заданным временем запаздывания. Использование очищенного сигнала способствует более точной настройке генератора на частоту интерференционного минимума, приводит к уменьшению амплитуды исходного минимального сигнала, обеспечивает возможность применения регистрирующего устройства с большим коэффициентом передачи.

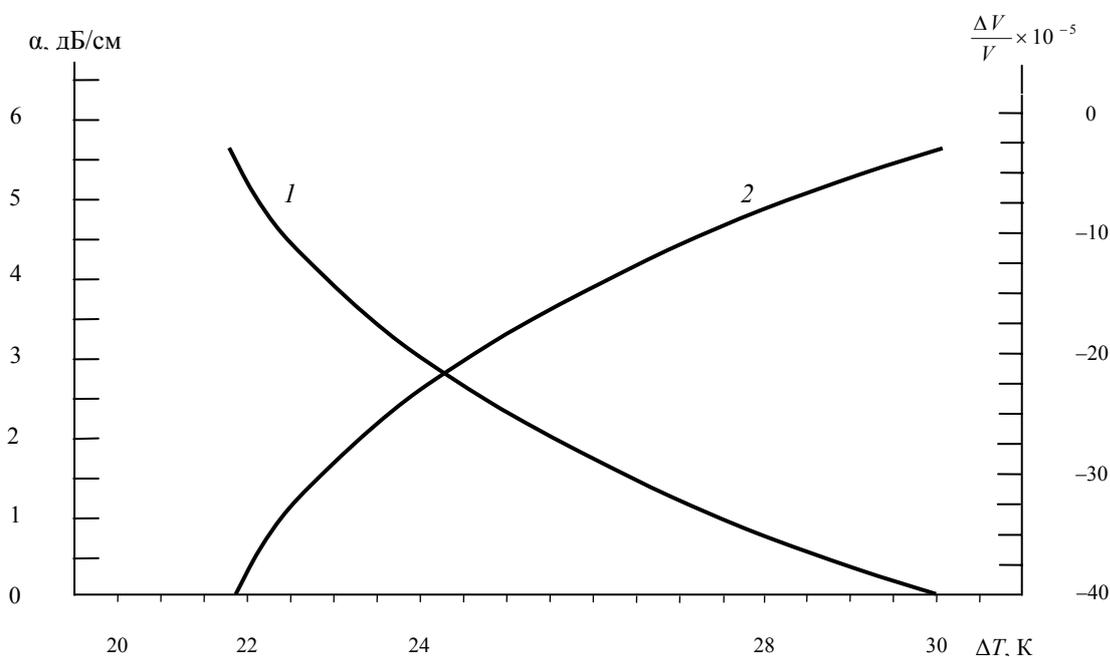


Рис. 3. Температурные зависимости затухания (1) и изменения скорости (2) ПАВ при полислоистой адсорбции пара воды на поверхности YZ- среза  $\text{LiNbO}_3$

Чувствительность данного метода зависит от следующих параметров измерительной установки: 1) коэффициента передачи регистрирующего устройства, который, кроме коэффициента передачи измерителя напряжения и усилителя, включает потери в приемном преобразователе; 2) разрешающей

способности измерителя напряжения; 3) амплитудного значения входного напряжения. Чувствительность метода повышается с увеличением длины акустического тракта, напряжения, подаваемого на излучающий ВШП, коэффициента передачи усилителя и регистрирующего устройства. Увеличение рабочей частоты и уменьшение скорости ПАВ также приводит к росту чувствительности. Метод был реализован в установке. Чувствительность метода была порядка  $10^{-6}$  для относительного изменения скорости ПАВ и  $10^{-3}$  дБ/см для изменения затухания.

Возможности метода иллюстрирует рис. 3, на котором приведены результаты исследования зависимости затухания и изменения фазовой скорости поверхностных акустических волн в процессе формирования адсорбционного слоя воды на поверхности ниобата лития при вариациях температуры звукопровода.

Изложенный метод определения малых изменений скорости и затухания поверхностных акустических волн обладает высокой чувствительностью и может быть применен для оценки состояния поверхности твердого тела, для измерения акустических и электрофизических параметров пленок и граничных слоев.

#### Литература

1. Анисимкин В.И., Гуляев Ю.В., Анисимкин И.В. Метод поверхностных акустических волн: новые аналитические возможности // Поверхность. – 2000. – № 8. – С. 3-9.
2. Доржин Г.Б., Симаков И.Г. Акустическое исследование адсорбированных слоев жидкостей // Акуст. журн. – 2002. – Т.48, №4. – С. 499-503.
3. Симаков И.Г., Гулгенов Ч.Ж. Влияние адсорбированной воды на параметры поверхностных акустических волн при вариациях температуры подложки // Вестник Тюменского государственного университета. – 2009. – №6. – С. 52-59.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
5. Физическая энциклопедия. Т.1. Адсорбция. – М.: Сов. Энциклопедия, 1988. – С. 30-32.
6. Волноводы для поверхностных акустических волн // Поверхностные акустические волны / под ред. А. Олинера. – М.: Мир, 1981. – С. 226-269.
7. Базаров В.Д., Басанов В.Б., Доржин Г.Б., Симаков И.Г. Измерение малых затуханий и изменений скорости ультразвуковых поверхностных волн // Акуст. журн. – 1978. – Т.24, №6. – С. 813-815.

Симаков Иван Григорьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, отдел физических проблем, Бурятский научный центр СО РАН. 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8, e-mail: [lmf@pres.bscnet.ru](mailto:lmf@pres.bscnet.ru)

Гулгенов Чингис Жаргалович, кандидат технических наук, инж., отдел физических проблем, Бурятский научный центр СО РАН. 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8, e-mail: [gchj@rambler.ru](mailto:gchj@rambler.ru)

Simakov Ivan Grigorievich, candidate of physics and mathematics, senior researcher, department of physical problems, Buryat Scientific Center SB RAS.

Gulgenov Chingis Zhargalovich, candidate of engineering, engineer, department of physical problems, Buryat Scientific Center SB RAS.

УДК 539.21

## УПРУГИЕ СВОЙСТВА ПОЛИКРИСТАЛЛОВ СПЛАВОВ $Sm_{1-x}Y_xS$ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ВАЛЕНТНОСТЬЮ

В.Н. Беломестных, Е.П. Теслева

*Работа выполнена при поддержке губернатора Кемеровской области А.Г. Тулеева (грант 2010 г. молодым ученым на проведение фундаментальных и прикладных исследований по приоритетным направлениям социально-экономического развития Кемеровской области)*

*Исследуются упругие свойства поликристаллов сплавов  $Sm_{1-x}Y_xS$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) с промежуточной валентностью при стандартных условиях. На основе сведений о постоянных жесткости  $c_{ij}$  и плотности данной смешанной системы проведен расчет упругих модулей, коэффициента Пуассона, скоростей распространения чисто продольных и поперечных упругих волн, средней и среднеквадратичной скоростей звука, параметра Грюнайзена, а также характеристической температуры Дебая в зависимости от примесной концентрации иттрия.*

Ключевые слова: коэффициент Пуассона, поликристалл, параметр Грюнайзена.