

08:12

©1994 г.

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ «ОТКЛИК» ДАТЧИКОВ ГАЗОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ (ПАВ)

В.И.Анисимкин, И.М.Котелянский, Э.Верона

Институт радиотехники и электроники РАН,

103907, Москва, Россия

Институт акустики, Рим, Италия

(Поступило в Редакцию 17 января 1994 г.)

Предложен метод оценки парциальных вкладов от массовой и упругой нагрузки в результирующий газовый «отклик» датчиков на ПАВ. На примере ПАВ датчиков водорода с пленками палладия продемонстрирована возможность управления этими вкладами путем выбора материала подложки. Проведено численное моделирование изменений фазовой скорости ПАВ в слоистой структуре при очередном изменении отдельных упругих параметров газочувствительной пленки. Для аналитической оценки вкладов от массовой и упругой нагрузки пленки применен метод возмущений. Этот метод позволил рассчитать результирующий «отклик» ПАВ датчика в терминах характеристик распространения ПАВ, упругих свойств пленки и относительных изменений плотности и упругих модулей пленки, которые возникают при адсорбции детектируемого газа. Обсуждаются возможности управления чувствительностью и/или селективностью датчиков газов на ПАВ.

Введение

В настоящее время интенсивно исследуются датчики газов на ПАВ (рис. 1). Как известно [1], принцип действия таких датчиков основан на изменении фазовой скорости ПАВ в слоистой структуре газочувствительная пленка/пьезоэлектрическая подложка при адсорбции газа этой пленкой. Изменение фазовой скорости ПАВ в основном связано с изменениями плотности (массовой нагрузки), упругих модулей (упругой нагрузки) и проводимости пленки [2]. Однако при оценке величины «отклика» газового ПАВ датчика упругая нагрузка часто не учитывается (см., например, [3-5]). В нашей предыдущей работе [6] на примере датчика водорода с газочувствительной пленкой Pd показана необходимость такого учета, так как вклады массовой и упругой нагрузок

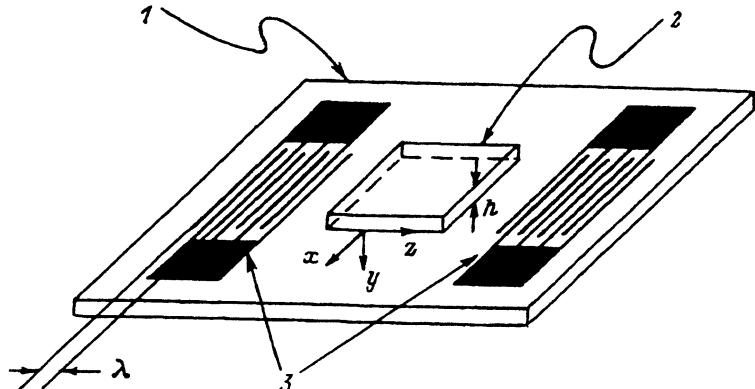


Рис. 1. Типичная конструкция датчика газов на ПАВ.
 1 — пьезоэлектрическая подложка, 2 — газочувствительная пленка, 3 — встречно-штыревые преобразователи для возбуждения и приема ПАВ.

в “отклик” ПАВ могут быть сравнимы по величине. Более того, они могут складываться или вычитаться, соответственно увеличивая или уменьшая величину этого “отклика”.

В настоящей работе для различных комбинаций изотропной пленки и изотропной подложки проведен численный расчет зависимости скорости распространения ПАВ от относительных изменений плотности и упругих модулей газочувствительной пленки. С использованием метода возмущений проведен анализ парциальных вкладов массовой и упругой нагрузки в результирующий “отклик” ПАВ. Это сделано в терминах характеристик распространения ПАВ в анизотропной подложке с произвольной степенью симметрии, упругих свойств изотропной пленки и относительных изменений ее плотности $\Delta\hat{\rho}/\hat{\rho}$ и упругих модулей $\Delta\hat{C}_{11}/\hat{C}_{11}$, $\Delta\hat{C}_{44}/\hat{C}_{44}$.

Для экспериментальной проверки предлагаемой методики расчетов выбраны 4 подложки из различных материалов и на каждой из них одновременно изготовлены пленки одного и того же материала (Pd). Затем для полученных тестовых структур измерены значения групповой скорости ПАВ V_g и относительные изменения ее фазовой скорости $\Delta V/V$ (газовый “отклик” ПАВ) при введении в рабочую камеру исследуемого газа (H_2). Из экспериментальных значений V_g рассчитывались абсолютные значения плотности и упругих модулей газочувствительной пленки, а из экспериментальных значений $\Delta V/V$ — относительные изменения этих же параметров, которые обусловлены адсорбцией молекул газа этой пленкой. После этого выбирались 2 новые тестовые структуры с теми же пленками Pd, но другими подложками. Для новых структур снова измерялись значения “откликов” ПАВ $\Delta V/V$ на действие того же газа. Полученные экспериментальные значения “откликов” сравнивались со значениями, рассчитанными с использованием ранее найденных величин $\hat{\rho}$, \hat{C}_{11} , \hat{C}_{44} , $\Delta\hat{\rho}/\hat{\rho}$, $\Delta\hat{C}_{11}/\hat{C}_{11}$, $\Delta\hat{C}_{44}/\hat{C}_{44}$.

Численный расчет скорости распространения ПАВ в слоистых структурах в зависимости от относительных изменений упругих параметров газочувствительной пленки

В этом разделе рассчитываются изменения скорости распространения ПАВ в различных слоистых структурах в зависимости от изменений одного из упругих параметров пленки (остальные параметры слоистой структуры считаются неизменными).

Поскольку газовые датчики на ПАВ представляют собой слоистые структуры, в которых чувствительная к газу пленка имеет толщину h намного меньше длины акустической волны ПАВ λ ($h/\lambda \lesssim 0.01$), то при анализе таких структур можно ограничиться рассмотрением одной акустической моды (ПАВ Рэлея), а дисперсионную зависимость этой моды аппроксимировать линейной функцией с наклоном $S = (1/V)(\partial V/\partial(h/\lambda))_{h=0}$. Для последовательного охвата возможно большего числа комбинаций материалов мы ограничились пленками и подложками из упругоизотропных материалов. Это позволило воспользоваться предложенной в [7] диаграммой (рис. 2) для широкого круга изотропных слоистых структур. На этой диаграмме каждой точке соответствует определенная слоистая структура с упругими параметрами пленки $\hat{\rho}$, \hat{C}_{44} и подложки ρ , C_{44} . Для структур, соответствующих пунктиру штриховой А, идущей под углом 45° к обеим осям, скорости акустических сдвиговых волн в пленке и подложке одинаковы.

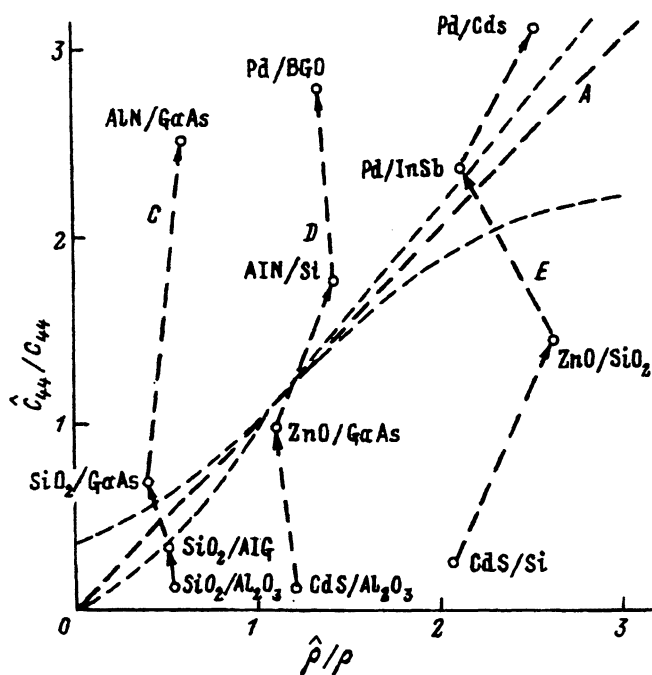


Рис. 2. Диаграмма для описания слоистых структур из изотропных пленок и изотропных подложек [7].

$\hat{\rho}$, \hat{C}_{44} — плотность и упругий модуль сдвига материала пленки; ρ , C_{44} — материала подложки.

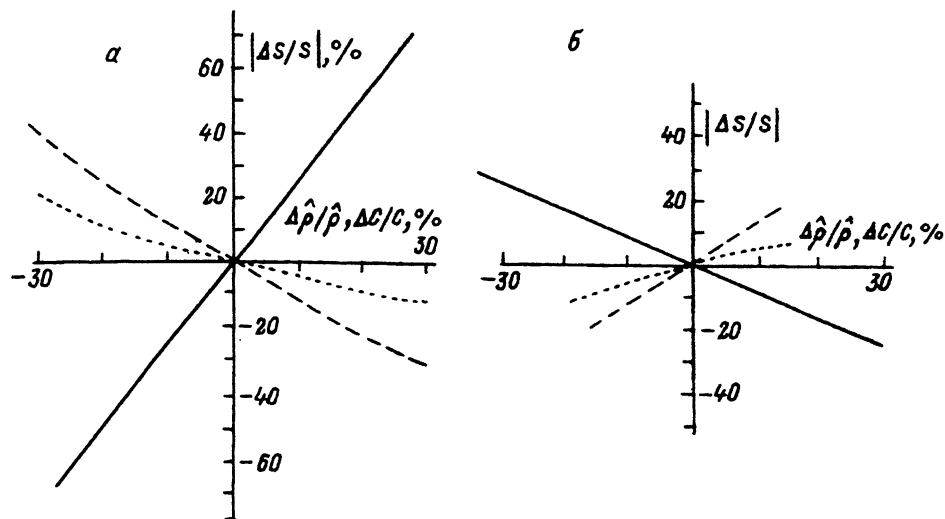


Рис. 3. Относительные изменения начального наклона дисперсионной кривой ПАВ в слоистых структурах в зависимости от относительных изменений упругих параметров пленочного материала.

a — пленка Pd на подложке ST, X-SiO₂, *б* — пленка Pd на подложке (001), (110)-Bi₁₂GeO₂₀. Сплошная линия — зависимость $|\Delta S/S|$ от $\Delta\hat{\rho}/\hat{\rho}$, штриховая — зависимость $|\Delta S/S|$ от $\Delta\hat{C}_{44}/\hat{C}_{44}$, пунктир — зависимость $|\Delta S/S|$ от $\Delta\hat{C}_{11}/\hat{C}_{11}$. Материальные постоянные — из работ [8,9].

Для структур, лежащих ниже прямой *A*, наличие пленки уменьшает скорость ПАВ по сравнению с ее значением на чистой подложке. В этом случае говорят о структурах типа “медленная” пленка на “быстрой” подложке. Напротив, для структур, лежащих выше прямой *A*, скорость ПАВ в присутствии пленки увеличивается и говорят о структурах “быстрая” пленка на “медленной” подложке.

Меняя материал пленки и/или материал подложки, мы осуществляли перебор различных структур, показанных точками на рис. 2, и следовали линиям *C*, *D*, *E* на этом рисунке. Для каждой из выбранных структур плотность ρ и упругие модули C_{11} , C_{44} подложки фиксировались, а плотность $\hat{\rho}$ и упругие модули \hat{C}_{11} , \hat{C}_{44} пленки варьировались попеременно один за другим в пределах $\pm 30\%$ относительно средних значений. В результате расчетов для каждой из структур получали по 3 зависимости относительного изменения наклона дисперсионной характеристики $|\Delta S/S|$ от величин $\Delta\hat{\rho}/\hat{\rho}$, $\Delta\hat{C}_{11}/\hat{C}_{11}$ и $\Delta\hat{C}_{44}/\hat{C}_{44}$.

Так, для структур типа “медленная” пленка на “быстрой” подложке характер изменения величины наклона S от величин $\Delta\hat{\rho}/\hat{\rho}$, $\Delta\hat{C}_{11}/\hat{C}_{11}$, $\Delta\hat{C}_{44}/\hat{C}_{44}$ идентичен приведенному на рис. 3, *a*, где S растет с увеличением $\hat{\rho}$ и уменьшается с увеличением \hat{C}_{11} и \hat{C}_{44} . Для структур же “быстрая” пленка на “медленной” подложке он идентичен приведенному на рис. 3, *б*, где S уменьшается с ростом $\hat{\rho}$ и увеличивается с ростом \hat{C}_{11} и \hat{C}_{44} .

При одновременном увеличении или одновременном уменьшении всех трех параметров пленки $\hat{\rho}$, \hat{C}_{11} , \hat{C}_{44} результирующее изменение S , как правило, невелико. Например, при одновременном умень-

шении плотности и обоих упругих модулей пленки Pd в структуре Pd/ST, X-SiO₂ на 10% парциальные изменения наклона S составляют соответственно -26 , $+5$ и $+12\%$, в результате чего результирующее изменение S равно -9% . Если же хотя бы один из упругих модулей пленки меняется противоположно изменению ее плотности, то результирующее изменение S может возрасти. Например, при уменьшении плотности $\hat{\rho}$ и модуля \hat{C}_{11} пленки Pd в той же структуре на -10% , но увеличении модуля \hat{C}_{44} этой пленки на $+10\%$ парциальные изменения S составляют соответственно -26 , $+5$ и -11% и результирующее изменение S равно -32% , т.е. на 23% больше.

В структурах “промежуточного” типа, в которых скорости сдвиговых волн в материалах пленки и подложки примерно одинаковы, изменения параметров пленки могут привести к изменению не только величины, но и знака наклона S . Это, как известно [7], означает изменение типа слоистой структуры, т.е. ее трансформацию с первоначально “замедляющей” в “ускоряющую” или наоборот в результате изменений упругих параметров пленки.

Расчет газового “отклика” ПАВ методом теории возмущений

В этой части работы определяется аналитическое выражение для “отклика” ПАВ в терминах характеристик распространения ПАВ, а также абсолютных значений и относительных изменений плотности и упругих модулей пленки.

Как было показано в работе [8], при рассмотрении слоистых структур с очень тонкими пленками ($h\lambda \lesssim 0.01$) расчет фазовой скорости ПАВ может проводиться методом возмущений, а значение скорости в геометрии рис. 1 определяться из выражения

$$\frac{v \cdot v_0}{v_0} = -\frac{v_0 h}{4P} \left[\left(\hat{\rho} - \frac{\hat{\mu}}{v_0^2} \right) |v_x|^2 + \hat{\rho} |v_y|^2 + \left(\hat{\rho} - \frac{4\hat{\mu}}{v_0^2} \frac{\hat{\lambda} + \hat{\mu}}{\hat{\lambda} + 2\hat{\mu}} \right) |v_z|^2 \right]_{y=0}. \quad (1)$$

Здесь $\hat{\rho}$, $\hat{\lambda}$, $\hat{\mu}$ — плотность и константы Лямэ пленки; V_0 — фазовая скорость ПАВ на чистой подложке; P — усредненное значение невозмущенной плотности потока энергии ПАВ на единицу ширины пучка; v_i — компоненты скорости движения частиц волны на свободной поверхности подложки. При подстановке в (1) нормализованных механических компонент ПАВ в виде $A_i = (|v_i|/P^{1/2})_{y=0} \cdot \omega^{-1/2}$, где ω — циклическая частота, и известных соотношений между константами Лямэ и упругими параметрами пленки [8] и выражения для групповой скорости ПАВ V_g через ее фазовую скорость V [8], получаем выражение

$$V = V_0 - \frac{V_0^3}{4} \left[\hat{\rho} (A_x^2 + A_y^2 + A_z^2) - \left(\frac{2A_z}{V_0} \right)^2 \hat{C}_{44} \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \frac{\hat{C}_{44}}{\hat{C}_{11}} \right) - \left(\frac{A_x}{V_0} \right)^2 \hat{C}_{44} \right] \left(\frac{2\pi h}{\lambda} \right). \quad (2)$$

Величины A_x, A_y, A_z для многих материалов и кристаллографических срезов рассчитаны и табулированы в [8,9]. Если, далее, параметры пленки $\hat{\rho}, \hat{C}_{11}, \hat{C}_{44}$ модулируются малыми изменениями $\Delta\hat{\rho}, \Delta\hat{C}_{11}, \Delta\hat{C}_{44}$ (например, в результате адсорбции газа пленкой), то фазовая скорость ПАВ V также испытывает изменения. Новое значение скорости получается подстановкой в модифицированное, как и выше, выражение (1) модифицированных материальных параметров пленки $\hat{\rho} - \Delta\hat{\rho}, \hat{C}_{11} - \Delta\hat{C}_{11}, \hat{C}_{44} - \Delta\hat{C}_{44}$. Обычно в эксперименте "откликом" газового ПАВ датчика служит измеряемое относительное изменение фазовой скорости $\Delta V/V$, получаемое из (2) в виде

$$\frac{\Delta V}{V} = \left(\frac{\pi h}{2\lambda}\right) \left[-\frac{\Delta\hat{\rho}}{\hat{\rho}} \left\{ (A_x^2 + A_y^2 + A_z^2) \hat{\rho} V_0^2 \right\} + \frac{\Delta\hat{C}_{44}}{\hat{C}_{44}} \left\{ (4A_z^2 + A_x^2) \hat{C}_{44} \right\} + \left(\frac{\left(1 - \frac{\Delta\hat{C}_{44}}{\hat{C}_{44}}\right)^2}{1 - \frac{\Delta\hat{C}_{11}}{\hat{C}_{11}}} - 1 \right) \left\{ 4A_z^2 \frac{\hat{C}_{44}^2}{\hat{C}_{11}} \right\} \right]. \quad (3)$$

Как видно из (3), "отклик" ПАВ представляет собой сумму трех членов: первый зависит от изменений плотности пленки (изменения массовой нагрузки), а второй и третий члены — только от изменений упругих модулей пленки (изменения упругости нагрузки). При этом вклады массовой и упругой нагрузки независимы друг от друга. Если помимо указанных величин под действием газа изменяются и другие физические параметры пленки (например, ее проводимость), то в уравнении (3) появятся дополнительные члены, учитывающие эти изменения. Кроме того, при использовании газочувствительных пленок из материалов, изначально имеющих металлическую проводимость (например, пленок Pd), требуется дополнительно учитывать закорачивание такой пленкой электрических полей ПАВ на поверхности пьезоэлектрической подложки уже в исходном состоянии, т.е. до адсорбции газа. Это осуществляется путем введения в (3) значений A_x, A_y, A_z и V_0 , соответствующих "закороченной" поверхности пьезоэлектрической подложки. Такие значения можно найти, например, в [8,9].

Отметим, что продемонстрированная в работе [6] зависимость газового "отклика" ПАВ от доли упругой энергии волны τ , сконцентрированной в пределах пленочного покрытия, учитывается в выражении (3) величиной нормированной толщины пленки h/λ : при малых толщинах пленки величины τ и h/λ пропорциональны друг другу [6].

Экспериментальная методика

Экспериментальная часть работы проводилась с использованием слоистой структуры газочувствительная пленка Pd/пьезоэлектрическая подложка. Такая структура, как известно, является основой ПАВ датчика водорода (рис. 1). Выбор в нашем случае в качестве материала газочувствительного слоя Pd объясняется следующим. Палладий по отношению к газу-адсорбенту (водороду) обладает высокой

чувствительностью и селективностью и при этом практически не вступает с ним в химическое взаимодействие. Такое сочетание свойств пленки Pd позволяет получать достаточно точные и воспроизводимые экспериментальные результаты.

Пленки Pd изготавливались методом термического напыления в вакууме на подложках ST , $X\text{-SiO}_2$, $YZ\text{-LiNbO}_3$, (001) , $\langle 110 \rangle\text{-Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $ZX\text{-CdS}$, $\text{ZnO}/(001)$, $\langle 100 \rangle\text{-Si}$ и $\text{ZnO}/(111)$, $\langle 110 \rangle\text{-Si}$. Как показал рентгеноструктурный анализ, пленки имели поликристаллическую структуру с хаотическим расположением кристаллитов размером $100\text{--}200 \text{ \AA}$. Благодаря хаотической ориентации кристаллитов и малости их размеров по сравнению с акустической длиной волны ПАВ тестовые пленки представляли собой упругоизотропные среды, которые можно было характеризовать двумя независимыми модулями упругости \hat{C}_{11} , \hat{C}_{44} и плотностью $\hat{\rho}$. Для повышения воспроизводимости свойств пленок их осаждение на различные подложки производилось одновременно в одном технологическом цикле. Толщины пленок h составляли 1100 \AA , длина волны ПАВ $\lambda = 20 \text{ мкм}$, отношение $h/\lambda = 0.0055$. В эксперименте использовалась газовая смесь 1%-го водорода с азотом. Измерения проводились при комнатной температуре и атмосферном давлении.

На 1-м этапе определялись плотность $\hat{\rho}$ и упругие модули \hat{C}_{11} , \hat{C}_{44} пленок Pd. Для этого в четырех структурах с пленками Pd на подложках ST , $X\text{-SiO}_2$; $YZ\text{-LiNbO}_3$; (001) , $\langle 110 \rangle\text{-Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и Z , $X\text{-CdS}$ измерялись групповые скорости распространения ПАВ V_g . Измеренные значения подставлялись в соответствующие аналитические выражения типа уравнения (2), давая 4 уравнения относительно неизвестных параметров пленки $\hat{\rho}$, \hat{C}_{11} , \hat{C}_{44} . Решая эти уравнения с применением процедуры наилучшего удовлетворения всем четырем уравнениям, получали искомые значения упругих параметров пленки. Более подробное описание этих измерений и последующего пересчета приведены в нашей работе [10].

Измеренные значения составили $\hat{\rho} = 11\,000 \text{ кг/м}^3$, $\hat{C}_{11} = 190 \text{ ГПа}$, $\hat{C}_{44} = 40 \text{ ГПа}$. Точность измерений равнялась $\pm 10\%$.

На 2-м этапе определялись относительные изменения этих же параметров $\Delta\hat{\rho}/\hat{\rho}$, $\Delta\hat{C}_{11}/\hat{C}_{11}$, $\Delta\hat{C}_{44}/\hat{C}_{44}$, которые возникали при адсорбции водорода пленкой Pd. С этой целью для тех же тестовых структур измерялись величины $\Delta V/V$ — “отклик” ПАВ на наличие водорода. В измерениях использовался измеритель четырехполосников марки НР 8753А в режиме измерения фазы. Измеренные значения “откликов” для указанных структур составили соответственно -104 , -22 , -53 и -67 частей 10^{-6} . Эти 4 экспериментальных значения $\Delta V/V$ подставлялись в (3), давая 4 уравнения относительно искомых параметров $\Delta\hat{\rho}/\hat{\rho}$, $\Delta\hat{C}_{11}/\hat{C}_{11}$, $\Delta\hat{C}_{44}/\hat{C}_{44}$.

Как и выше, решение этих уравнений проводилось с использованием процедуры наилучшего удовлетворения сразу всем уравнениям. Точность методики оценивается как $\pm 20\%$. Полученные результаты представлены в табл. 1.

После определения абсолютных значений и относительных изменений упругих параметров пленки Pd, используя выражение (3), рассчитывали значения коэффициентов при первом, втором и третьем членах

Таблица 1. Относительные изменения упругих параметров пленки Pd, вызванные ее взаимодействием с водородом (1% H₂+N₂)

$\Delta\hat{\rho}/\hat{\rho}, \%$	$\Delta\hat{C}_{11}/\hat{C}_{11}, \%$	$\Delta\hat{C}_{44}/\hat{C}_{44}, \%$
+ (0.11 ± 0.02)	+ (29 ± 4)	- (28 ± 6)

Таблица 2. Величины коэффициентов при 1-, 2-, 3-м членах уравнения (3)

Материал и срез подложки	$\{(A_x^2 + A_y^2 + A_z^2)\hat{\rho}V_0^2\}$	$\{(4A_x^2 + A_z^2)\hat{C}_{44}\}$	$\{4A_x^2\hat{C}_{44}^2/\hat{C}_{11}\}$
Пленка ZnO на (001), (100)-Si (hλ = 0.034)	5.06	1.31	0.275
Пленка ZnO на (111), (110)-Si (h/λ = 0.1)	2.14	0.55	0.0363

Таблица 3. Сравнение ПАВ датчиков водорода на основе различных слоистых структур

Структура	ПАВ-“отклик” $\Delta V/V, 10^{-6}$		Массовая нагрузка (расчет), (%)	Упругая нагрузка (расчет), (%)
	измерение	расчет		
Pd/ZnO/(100)-Si	-115	-110	44	56
Pd/ZnO/(111)-Si	-215	-375	5	95

в этом выражении для 2 новых тестовых структур Pd/ZnO/(100)-Si с относительной толщиной пленки ZnO $h/\lambda = 0.043$ и Pd/ZnO/(111)-Si с $h/\lambda = 0.1$. Результаты расчетов представлены в табл. 2. Необходимые для расчетов значения A_x, A_y, A_z и V_0 на поверхности каждой из структур определялись численным расчетом.

Затем, используя выражение (3), для структур Pd/ZnO/(100)-Si и Pd/ZnO/(111)-Si рассчитывались величины “откликов” ПАВ на действие водорода. Результаты расчетов представлены в табл. 3. В этой же таблице приведены экспериментальные значения “откликов”, измеренные в тех же структурах. Видно, что рассчитанные и измеренные значения “откликов” для структуры Pd/ZnO/(100)-Si хорошо совпадают друг с другом, а для структуры Pd/ZnO/(111)-Si это совпадение качественное. Количественное отличие, по нашему мнению, связано с тем, что здесь используется более толстая пленка ZnO, а с увеличением толщины пленок погрешность в определении их упругих параметров оказывает большее влияние на расчет параметров ПАВ в такой структуре.

В табл. 3 приведены также рассчитанные с использованием выражения (3) парциальные вклады массовой и упругой нагрузки в результи-

рующий "отклик" ПАВ. Сравнение этих вкладов показывает, что для структуры Pd/ZnO/(100)-Si эти вклады практически одинаковы, тогда как для структуры Pd/ZnO/(111)-Si вклад упругой нагрузки является доминирующим.

Подчеркнем, что описанная выше методика справедлива в предположении, что упругие свойства пленок Pd, изготовленных на подложках из различных материалов, одинаковы, что, строго говоря, не так. Но, с другой стороны, с помощью этой методики удастся получать параметры пленок, усредненные сразу по нескольким подложкам, т.е. более универсальные значения.

Выводы

Проведенная экспериментальная проверка подтвердила, что выражение (3) по крайней мере качественно верно описывает зависимость "отклика" газового ПАВ датчика от изменений упругих модулей пленки при адсорбции детектируемого газа. Это выражение позволяет оценивать парциальные вклады массовой и упругой нагрузки в результирующий газовый "отклик" ПАВ, а также прогнозировать величину "отклика", а значит, и чувствительность ПАВ датчиков для различных материалов пленок и подложек. В частности, для данного газа и данного материала пленки возможно увеличение величины газового "отклика" ПАВ (т.е. чувствительности) или управление соотношениями между различными "откликами" на разные газы (т.е. селективностью) только за счет соответствующего выбора материала подложки и/или ее кристаллографического среза. Это свойство, являющееся следствием независимости вкладов различных механизмов в результирующий "отклик", выгодно отличает ПАВ датчики газов от датчиков газов других типов (на основе объемных акустических волн, электрических резисторов и т.д.), работа которых основана на изменении только одного физического параметра (плотности, электросопротивления и пр.).

Данная работа частично поддержана Программой совместных грантов НАТО, № 920973.

Список литературы

- [1] Wohltjen H. // Proc. 4th Intern. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'87). Tokyo, 1987. P. 471-477.
- [2] Ricco A.J., Martin S.J. // Thin Solid Films. 1991. N 206. P. 94-101.
- [3] Christofides C. // J. Appl. Phys. 1990. Vol. 68. N 6. P. R1-R30.
- [4] Wohltjen H. // Sensors and Actuators. 1984. N 5. P. 307-324.
- [5] Mingfang L., Haiguo L. // Sensors and Actuators. 1993. N 12. P. 53-56.
- [6] Анисимкин В.И., Котелянский И.М. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 2. С. 200-202.
- [7] Farnell G., Adler E.L. Physical Acoustics. New York; London: Academic Press, 1972. P. 308.
- [8] Auld B.A. Acoustic Fields and Waves in Solids. New York; London; Sydney; Toronto: Wiley Interscience Publication, 1973. Vol. 2. 416 p.
- [9] Slobodnik A.J., Jr., Conway E.D., Delmonico R.T. Microwave Acoustic Handbook. Air Force Cambridge Research Laboratory Report AFCRL-TR-73-0597. Cambridge, MA, 1973. Vol. 1A. 728 p.
- [10] Анисимкин В.И., Котелянский И.М., Верарди П., Верона Э. // ФТТ. 1994. Т. 36. Вып. 2. С. 428-435.