

08: 12

© 1990 г.

## ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ ДЛЯ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ: ПОЛУЧЕНИЕ, СВОЙСТВА, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

*В. И. Анисимкин, И. М. Котелянский*

Рассмотрены особенности получения пьезоэлектрических пленок ZnO, AlN и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Проведена теоретическая оценка минимально возможного коэффициента поглощения ПАВ в текстурированных пленках с учетом различных механизмов поглощения. Дано сравнение этих коэффициентов с аналогичными коэффициентами для монокристаллов тех же материалов. Предложены и экспериментально проверены методики расчета коэффициента поглощения и температурного коэффициента задержки (ТКЗ) для ПАВ Рэля и ПАВ Сезава в слоистых структурах. Дан сравнительный анализ акустических характеристик слоистых структур на основе пленок ZnO, AlN и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

### Введение

Одним из альтернативных путей создания акустоэлектронных устройств на ПАВ является использование слоистых структур, содержащих пьезоэлектрические пленки. Такие структуры позволяют в зависимости от потребностей менять в широких пределах скорость ПАВ  $V^R$ , достигать больших коэффициентов электромеханической связи  $K^2$  [1] или производить искусственную термостабилизацию ПАВ устройств путем соответствующего подбора материалов пленки и подложки.

В настоящей работе рассмотрены особенности получения наиболее распространенных текстурированных пьезоэлектрических пленок ZnO и AlN, а также Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; проведено сравнение акустических характеристик слоистых структур на основе этих пленок и их оптимизация.

### Особенности получения пьезоэлектрических пленок ZnO, AlN, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

Пьезоэлектрические пленки в устройствах на ПАВ являются средой, в которой помимо электромеханического преобразования высокочастотных колебаний происходит распространение, а следовательно, и поглощение ПАВ. К этим пленкам предъявляются дополнительные требования повышенной плотности и уменьшенных поперечных размеров столбчатых кристаллитов пленки до нескольких сотен ангстрем [2].

Пленки ZnO и AlN с аксиальной текстурой <0001> могут быть получены в двух условиях формирования: текстуры зарождения и текстуры роста. Формирование текстуры зарождения характеризуется сравнительно высокими температурами кристаллизации, малыми скоростями роста и большими размерами кристаллитов. Для текстуры роста характерны сравнительно высокие скорости осаждения, большая плотность и малые поперечные размеры кристаллитов. Поэтому при изготовлении пьезопленок ПАВ устройств предпочтение отдается использованию условий формирования текстуры роста.

Наиболее полно условия формирования текстуры роста пленок ZnO и AlN удается реализовать в методе магнетронного реактивного распыления, который позволяет проводить осаждение с высокими скоростями (до 10 мкм/ч) в относи-

тельно высокому вакууму (до 0.1 Па). Результаты проведенных нами исследований показали, что для получения высокоэффективных пленок ZnO и AlN необходимо сочетать высокие (550—750 К) температуры подложки и большие (2—5 мкм/ч) скорости осаждения при давлении реактивной газовой смеси не более 0.5 Па. Увеличение давления снижает плотность пленки.

Направление оси текстуры роста определяется суммарным вектором потока осаждаемого вещества. Проведенный расчет радиальной зависимости направления суммарного вектора потока частиц, распыляемых из кольцевой зоны эрозии, исследования состава и структуры пленок показали, что причиной наблюдавшихся ранее особенностей роста оксидных пленок в магнетронной системе [3] является неоднородная бомбардировка растущего слоя энергетическими (300—500 эВ) атомами и ионами кислорода. Эта бомбардировка, помимо известных воздействий (дополнительного разогрева подложки, аморфизации растущего слоя и образования радиационных дефектов), сопровождается избирательным распылением кислорода с поверхности растущей пленки. С такой же кислородной бомбардировкой связано, по-видимому, и резкое ухудшение свойств пленки AlN при появлении в газовой реактивной смеси следов кислорода. Уменьшение энергии бомбардирующих кислородных частиц может быть достигнуто подбором конфигурации и напряженности магнитного поля магнетрона, раздельной подачей инертного (к мишени) и реактивного (к подложке) газов, перемещением подложек над поверхностью мишени.

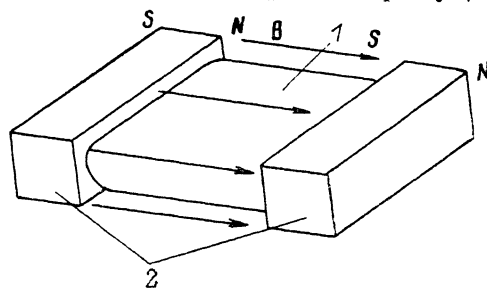


Рис. 1. Конструкция магнетрона с равномерно распыляемой мишенью.

1 — мишень, 2 — магниты.

С другой стороны, использование кислородной бомбардировки позволяет получать оксидные пленки с необычными свойствами, а также реализовать низкотемпературный синтез высокотемпературных оксидных соединений. Так, с использованием конструкции магнетрона с равномерно распыляемой мишенью (рис. 1), которая позволяет получать оксидные пленки в условиях однородной по большой поверхности ( $\sim 10 \text{ см}^2$ ) кислородной бомбардировки, нами были изготовлены пленки ZnO с необычной ориентацией оси текстуры  $\langle 0001 \rangle$ , лежащей в плоскости подложки. Использование кислородной бомбардировки позволило также получить пьезоэлектрические пленки  $\beta\text{-Ta}_2\text{O}_5$  с аксиальной текстурой типа  $\langle 110 \rangle$  орторомбической сингонии с параметрами решетки  $a=0.618$ ,  $b=0.366$ ,  $c=0.388 \text{ нм}$ .

Теоретическая оценка минимально возможного коэффициента поглощения ПАВ в текстурированных пленках гексагональной сингонии

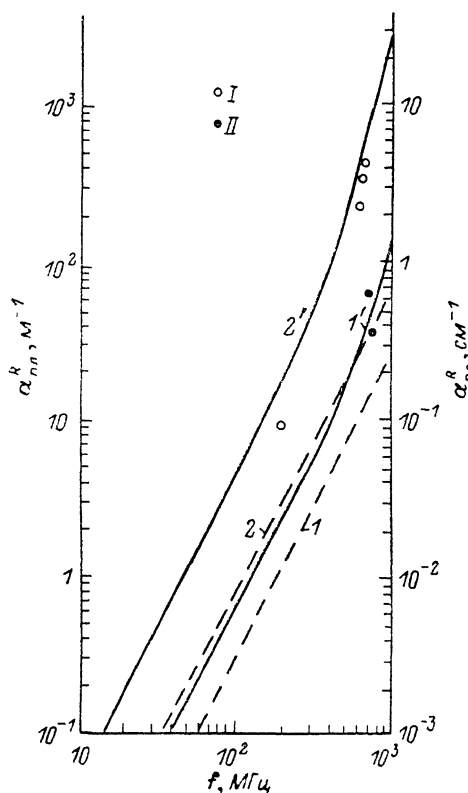
Оценивалось минимальное значение коэффициента поглощения ПАВ  $\alpha_{\text{пл}}^L$  в идеальной пленке, т. е. пленке, состоящей из плотноупакованных колонновидных кристаллитов гексагональной сингонии с осью  $C$ , перпендикулярной свободной поверхности. Основным выражением служило [4]

$$\alpha_{\text{пл}}^R = A\alpha_{\text{пл}}^L + (1 - A)\alpha_{\text{пл}}^T, \quad (1)$$

где  $\alpha_{\text{пл}}^L$  и  $\alpha_{\text{пл}}^T$  — коэффициенты поглощения продольной (L) и поперечной (T) волн в материале пленки,  $A$  — функция отношения  $V^L/V^T$  [4].

Значения  $\alpha_{\text{пл}}^L$  и  $\alpha_{\text{пл}}^T$  для различных механизмов поглощения рассчитывались с использованием хорошо известных теорий в [2]. Нами учитывались вязкоупругие и термоупругие потери, а также рассеяние ПАВ на статистически шероховатой поверхности и из-за взаимной разориентации кристаллитов. Расчеты проводились при комнатной температуре, для частот 10—1000 МГц и пленок с размерами кристаллитов 300 и 1000 Å. Предполагалось, что вся энергия ПАВ распространяется в пределах пленки.

Было получено, что даже в идеальном случае, когда пленка не содержит пустот и других несовершенств, кроме границ кристаллитов, коэффициент поглощения ПАВ в текстурированных пленках в несколько раз превышает таковой для монокристалла того же материала. Именно наличие границ кристаллитов приводит к увеличению вязкоупругих потерь, которые остаются доминирующими вплоть до частот  $f \ll \ll 500$  МГц. Выше 1 ГГц основным становится рассеяние ПАВ на статистически шероховатой поверхности. При этом наличие межкристаллитных границ увеличивает также термоупругие потери и меняет их частотную зависимость с квадратичной на корневую. Однако значение этой составляющей остается меньше вязкоупругих потерь и рассеяния на рельефе поверхности. Рассеяние же ПАВ вследствие разориентации кристаллитов пренебрежимо мало во всем частотном диапазоне. Поэтому в результате суммарный коэффициент поглощения ПАВ в идеальных текстурированных пленках ZnO и AlN складывается в основном из двух компонент — вязкоупругости и поверхно-



шероховатости. Это определяет и частотную зависимость  $\alpha_{\text{пл}}^R$ . Она меняется от  $\sim f^2$  при  $f < 500$  МГц до  $\sim f^5$  при  $f > 1$  ГГц (рис. 2). В идеальной пленке, содержащей различного рода несовершенства, поглощение ПАВ дополнительно возрастает.

Рис. 2. Частотная зависимость собственного поглощения ПАВ в монокристаллах (1, 2) и суммарного коэффициента поглощения ПАВ в поликристаллических текстурах (1', 2').

1, 1' — AlN; 2, 2' — ZnO; точки — экспериментальные результаты для пленок наилучшего качества: I — ZnO, II — AlN.

Таблица 1

Материал	Коэффициент, м <sup>-1</sup>					
	$\alpha_M^L$	$\alpha_M^T$	$\alpha_M^R$	$\alpha_{\text{пл}}^R$	$\alpha_R^R$	$\alpha_{\text{ш}}^R$
ZnO	6.4	3.2	3.4	19.5	$10^{-4}$	1
AlN	0.55	1.4	1.2	2.7	$10^{-5}$	0.04

Сравнение коэффициентов собственного поглощения ПАВ в идеальной пленке  $\alpha_{\text{пл}}^R$  и соответствующем монокристалле  $\alpha_M^R$ , а также коэффициентов поглощения ПАВ из-за рассеяния на разориентированных кристаллитах  $\alpha_{\text{ш}}^R$  и шероховатой поверхности  $\alpha_{\text{р}}^R$  приведены в табл. 1.

### Методика расчета коэффициента поглощения $\alpha_{\text{о.с}}$ и температурного коэффициента задержки (ТКЗ)<sub>о.с</sub> ПАВ в слоистых структурах

При распространении в пределах пленки только части  $\gamma$  энергии ПАВ, как это имеет место в реальных слоистых структурах, коэффициенты  $\alpha_{\text{с.с}}^R$  и (ТКЗ)<sub>с.с</sub><sup>R, S</sup> для ПАВ Рэлея R и ПАВ Сезава S могут определяться с помощью приближенных выражений

$$\alpha_{c.o}^{R,S} = r\alpha_{пл}^{R,S} + (1-r)\alpha_{пл.л.}^{R,S}, \quad (2)$$

$$TKZ_{c.o}^{R,S} = r(TKZ_{пл}^{R,S}) + (1-r)(TKZ_{пл.л.}^{R,S}), \quad (3)$$

где индексы с. с, пл и плл — значения этих коэффициентов в слоистой структуре, пленке и подложке соответственно.

Экспериментальная проверка выражений (2) и (3) (рис. 3, 4) дала хорошие результаты, позволяя использовать эти выражения для последующих оценок: расчета  $\alpha_{c.o}^{R,S}$  и  $(TKZ)_{c.o}^{R,S}$  в различных структурах с пленками ZnO и AlN

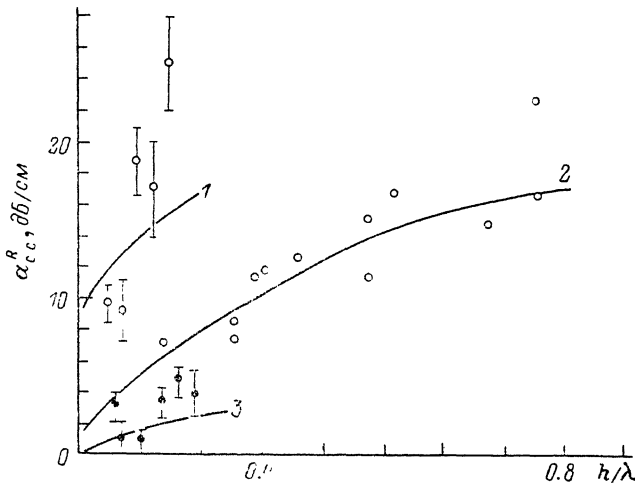


Рис. 3. Сравнение экспериментальных значений коэффициентов поглощения ПАВ Рэлея ( $R$ ) с расчетом (2) для слоистых структур ZnO/термостабильное стекло (1), ZnO/плавленый кварц (2) и ZnO/Si (3).

на подложках Si, GaAs,  $Al_2O_3$ , АИГ, плавленого кварца, а также для определения  $\alpha_{пл}^R$  и  $(TKZ)_{пл}^R$  для материала пленки по измеренным  $\alpha_{c.o}^R$  и  $(TKZ)_{c.o}^R$ , известным  $\alpha_{пл.л.}^R$  и  $(TKZ)_{пл.л.}^R$  и рассчитанным  $r$ . В табл. 2 дано сравнение найденных таким образом коэффициентов  $\alpha_{пл}^R$  и  $(TKZ)_{пл}^R$  пленок ZnO и AlN с аналогич-

Таблица 2

Материал		$\alpha^R$ (200 МГц), м <sup>-1</sup>	$\alpha^R$ (1 ГГц), м <sup>-1</sup>	$(TKZ)_{пл}^R$ , 10 <sup>-6</sup> (°C) <sup>-1</sup>	
Пленка	ZnO	20.5	3200	+34	
	AlN	2.7	190	-30	
Подложка	Si	2	55	+24	
	GaAs	8.7	218	+52	
	$Al_2O_3$	1	26.5	+60	
	АИГ	0.1	2.6	+28	
	Плавленый SiO <sub>2</sub>		7.5	188	-85

ными коэффициентами названных подложек. На рис. 5 в качестве примера приведены зависимости этих же коэффициентов от нормированной толщины пленки  $h/\lambda$  для слоистой структуры AlN/АИГ ( $\lambda$  — длина ПАВ).

### Определение акустических параметров тонких пленок

Определялись плотность  $\rho$ ; упругие модули  $\mu$ ,  $\sigma$ ; коэффициент  $K^2$  [5], пьезомодуль  $d_{33}$  [6], коэффициенты поглощения продольных  $\alpha_{пл}^L$ , поперечных  $\alpha_{пл}^T$  [7] и поверхностных  $\alpha_{пл}^R$  волн, а также температурные коэффициенты  $(TKZ)_{пл}^R$  для ПАВ в пленках ZnO и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Значения  $\rho$  и  $\mu$  находились из измерений зависимости фазовой скорости ПАВ в слоистой структуре методом наименьших квадратов [8]. Целевой функцией служила сумма квадратов отклонений расчетных значений скорости от экспериментальных. Параметры подложки считались известными. Плотность  $\rho$ , скорость поперечной  $V_{пл}^T$  и рэлеевской  $V_{пл}^R$  волн в пленке варьировались с шагом по  $\rho$  0.1 кг/м<sup>3</sup>, по  $V_{пл}^T$  и  $V_{пл}^R$  0.1 м/с. Точность определения  $\rho$ ,  $V_{пл}^T$ ,  $V_{пл}^R$  при ошибке измерения скорости ПАВ в слоистой структуре  $\sim 1\%$  составляла  $\leq 10\%$ . Повышение точности до 1% достигалось использованием значений скорости только из области слабой дисперсии (больших  $h/\lambda$ ).

Проверка разработанной методики проводилась на пленках ZnO. Значения

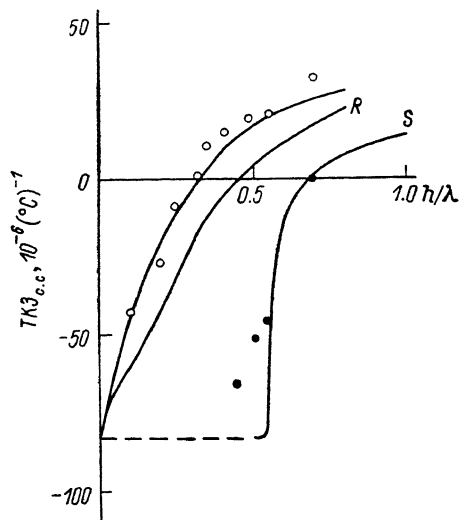


Рис. 4. Сравнение экспериментальных значений температурных коэффициентов задержки ПАВ Рэля  $R$  и ПАВ Сезава  $S$  с расчетом по (3) для слоистой структуры ZnO/плавленый кварц.

ния  $\rho$ ,  $V_{пл}^R$  и модуля сдвига  $\mu = (V_{пл}^T)^2 \rho$  этой пленки были примерно на 10% меньше таковых для монокристалла (табл. 3), что правильно отражает отличие кристаллической структуры текстурированной пленки с межкристаллитными границами, пустотами и другими несовершенствами от структуры более совершенного монокристалла.

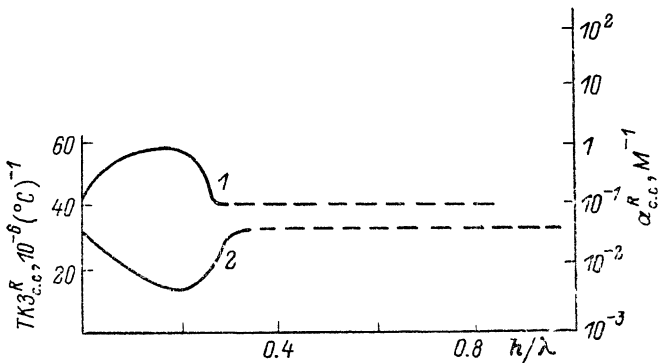


Рис. 5. Коэффициент поглощения  $\alpha_{c,c}^R$  (1) и температурный коэффициент задержки  $(TKZ)_{c,c}^R$  (2) ПАВ Рэля  $R$  в слоистой структуре AlN/АИГ. Расчет по (2) и (3) с использованием данных из табл. 2;  $\omega = 600$  МГц.

Применение той же методики к пленкам нового материала  $\beta$ -Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> позволило получить новые, ранее неизвестные параметры этого тонкопленочного материала (табл. 4).

### Оптимизация слоистых структур

Полученные в работе результаты позволяют провести сравнение пленок ZnO, AlN и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> с точки зрения их применения в акустоэлектронных устройствах на ПАВ.

Пленки  $\beta$ -Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> по своим акустическим свойствам близки к пленкам ZnO и уступают последним лишь по величине поглощения ПАВ. Большая диэлектрическая постоянная, малые оптические потери и высокая химическая стойкость Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> [9] в совокупности с его пьезоэлектрическими свойствами делают перспективным применение пленок Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в акустооптических устройствах.

Пленки AlN позволяют затермостабилизировать большее число слоистых структур, обеспечивают более высокие скорости распространения и меньшую диссипацию энергии ПАВ в слоистых структурах. Однако область существования ПАВ в структурах с пленками AlN ограничивается пленками малой толщины, а значение  $K^2$  при этом не превышает 0.5 %. С другой стороны, пленки ZnO позволяют получать более высокие  $K^2$  (до нескольких %) и обеспечивают существование поверхностных мод 1-го и более высоких порядков в широком диапазоне  $h/\lambda$ , однако эти пленки имеют и значительно больший коэффициент поглощения ПАВ.

Таблица 3

Относительное отличие акустических параметров пьезопленки ZnO от таковых для монокристалла из того же материала (%)

$\frac{\Delta \rho}{\rho}$	$\frac{\Delta \mu}{\mu}$	$\frac{\Delta V^R}{V^R}$	$\frac{\Delta V^T}{V^T}$	$\frac{\Delta V^L}{V^L}$	$\frac{\Delta \text{TKЗ}^R}{\text{TKЗ}^R}$	$\frac{\Delta \alpha^R}{\alpha^R}$
-12	-22	-5	-5	-20	+5	+800

Анализ зависимостей  $V_{c.c.}^R(h/\lambda)$ ,  $K^2(h/\lambda)$ ,  $\alpha_{c.c.}^R(h/\lambda)$  и  $\text{TKЗ}_{c.c.}^R(h/\lambda)$  для различных слоистых структур показал, что наилучшим сочетанием нескольких параметров ( $V_{c.c.}^R$ ,  $\alpha_{c.c.}^R$  и  $\text{TKЗ}_{c.c.}^R$ ) обладает структура AlN/AИГ (рис. 5): при  $h/\lambda = 0.2$  она имеет  $V_{c.c.}^R = 4700$  м/с,  $\alpha_{c.c.}^R = 16.7$  м<sup>-1</sup> (600 МГц) и  $\text{TKЗ}_{c.c.}^R = +13.4 \cdot 10^{-6}$  (°C)<sup>-1</sup>. Значение  $K^2$  для этой структуры не превышает 0.5 %.

Наилучшим сочетанием других параметров —  $K^2$ ,  $V_{c.c.}^R$  и  $\alpha_{c.c.}^R$  обладает структура ZnO/YZ—LiNbO<sub>3</sub>, у которой при  $h/\lambda = 0.15$  значение  $K^2$  достигает 8.5 % [1], а  $V_{c.c.}^R = 3170$  м/с,  $\alpha_{c.c.}^R = 54.8$  м<sup>-1</sup> (600 МГц). Величина  $\text{TKЗ}_{c.c.}^R$ , однако, остается достаточно высокой  $+86 \cdot 10^{-6}$  (°C)<sup>-1</sup>.

Таблица 4

Акустические характеристики пьезопленки Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

$10^3 \rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$10^{10} \mu$ , Н/м <sup>2</sup>	$\sigma$	$V_{цл}^T$ , 10 <sup>3</sup> м/с	$V_{цл}^R$ , 10 <sup>3</sup> м/с	$V_{цл}^L$ , 10 <sup>3</sup> м/с	$\alpha_{цл}^R$ , дБ/см	$K_{\text{макс}}^2$ , %	$\text{TKЗ}_{цл}^R$ , 10 <sup>-6</sup> (°C) <sup>-1</sup>
8.6±0.4	5.8±0.3	0.29±0.09	2.6±0.1	2.4±0.1	4.8±0.8	35	0.2	+25

Другими интересными, на наш взгляд, комбинациями являются сведенные в табл. 5 структуры с нулевыми значениями ТКЗ. Из сравнения с обычно используемыми монокристаллами видно, что слоистые структуры могут давать более высокие скорости распространения и  $K^2$ , но в то же время обладают и большим поглощением ПАВ.

Поглощение ПАВ в слоистых структурах может быть снижено сравнением пленки между входным и выходным преобразователями [10]. Для тонких пленок  $h/\lambda = 0.03-0.05$  в области 1-го максимума  $K^2$  ( $K_{\text{макс}}^2 \approx 1$  %) потери на прохождение ПАВ ступеньки малы (~0.1 дБ) даже для ступеньки прямоугольного профиля. В этом случае для частот  $f > 300$  МГц требуемая толщина пленки, осажженной на металлический электрод, становится соизмеримой с толщиной переходного слоя. Этот слой может быть значительно уменьшен или практически устранен при использовании между металлическим электродом и пьезопленкой тонкого (500—1000 Å) подслоя желательно аморфной кристаллической структуры (например, для пьезопленки ZnO — подслоя SiO<sub>2</sub> с малой диэлектрической постоянной и отрицательным ТКЗ). При осаждении пьезоэлектрической пленки ZnO малой толщины (< 1 мкм) предпочтительно формировать пленку в условиях текстуры зарождения.

При необходимости получения  $K^2 > 1$  %, требующего использования пленок толщиной  $h/\lambda > 0.2$ , рассеяние ПАВ на ступеньке прямоугольного профиля

слишком велико [10] и необходим скос с плавной меняющейся толщиной пленки. Так, с использованием скоса линейного профиля протяженностью  $\sim 10 \lambda$  и углом  $< 3^\circ$  потери на рассеяние ПАВ были снижены с 12 до 2 дБ (структура ZnO/Si,  $f=200$  МГц).

Уменьшение потерь на распространение ПАВ при удалении пленки между входным и выходным преобразователями открывает новые возможности для использования слоистых структур и меняет требования к их оптимизации. Так, если пьезопленка находится только под (над) преобразователями, то, как

Таблица 5

Сравнение акустических характеристик обычно используемых монокристаллов и «оптимальных» слоистых структур с нулевыми значениями ТКЗ

Структура, монокристалл	$h/\lambda$	$v^R$ , м/с	$K^2$ , %	$\alpha^R$ , м <sup>-1</sup> (600 МГц)
ST, X SiO <sub>2</sub>	—	3158	0.16	34
001), (110) Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	—	3470	0.8	—
X, Y 33, 44° SiO <sub>2</sub>	—	3180	0.08	—
15° Y, X SiO <sub>2</sub>	—	3940	0.1	5*
AlN/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.48	5690	0.24	42
AlN/GaAs	0.05	2890	0.3	63
AlN/Si	0.13	4870	0.2	80
ZnO/плавленый SiO <sub>2</sub>	0.34	2620	2.9	330

\* Дополнительное к вязкоупругому поглощению слабоутекающей поверхностной моды.

правило, выгоднее использовать пленки из материала с большим  $K^2$  (например, ZnO). С другой стороны, использование пьезопленок из AlN в этом случае позволяет получать меньшие значения температурного коэффициента частоты.

В заключение отметим, что оптимизация акустических характеристик слоистых структур, которая сейчас находится на начальном этапе, имеет, по нашему мнению, хорошие перспективы. Она существенно дополнит ведущуюся в настоящее время оптимизацию кристаллографических срезов и типов акустических колебаний в пьезоэлектрических монокристаллах.

### Список литературы

- [1] Анисимкин В. И., Котелянский И. М. // Матер. XII Всесоюз. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. 1983. Ч. I. С. 158.
- [2] Анисимкин В. И., Котелянский И. М. // ФТТ. 1988. Т. 30. Вып. 3. С. 853—860.
- [3] Котелянский И. М., Крикунов А. И., Лузанов В. А., Синельникова В. В. // Электронная техника. Сер. Материалы. 1984. Вып. 5 (190). С. 46—48.
- [4] Викторов И. А. Звуковые поверхности волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 287 с.
- [5] Melngailis J., Vetelino J. F. // Appl. Phys. Lett. 1978. Vol. 32. N 4. P. 203—205.
- [6] Вьюн В. А., Юмашев В. Н., Яковкин И. Б. // ПТЭ. 1986. № 6. С. 192—193.
- [7] Баранский К. Н., Магомедов З. А., Павлов С. В. и др. // Микроэлектроника. 1982. Т. 11. № 5. С. 418—419.
- [8] Анисимкин В. И., Котелянский И. М. и др. // Матер. конф. «Акустоэлектронные устройства обработки информации». Черкассы, 1988. С. 238—239.
- [9] Teravaninthorn U., Miyahara Y., Morizumi T. // Jap. 1986. Vol. 25. N 3. Pt 1. P. 347—353.
- [10] Anisimkin V. I., Kotelyanskii I. M. // Proc. ISSWAS. Novosibirsk, 1986. Vol. 1. P. 323—326.

Институт радиотехники  
и электроники АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
5 марта 1989 г.  
В окончательной редакции  
18 декабря 1989 г.