

СЕНСОРНЫЕ МИКРОСИСТЕМЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Колешко В.М., Баркалин В.В., Полянская Е.В.

The most promising tendency in development сенсорики represents mining of intelligent sensory microsystems (ISMS) on the basis of integrating sensory, processor and actuators. At present work the problems of designing ISMS with SAW with frequency band 100 MHz — 2 GHz conforming to dimensional area of technology micro and a nanoelectronics and the microelectromechanics are discussed.

The main control parameters of ISMS with SAW are determined. The SAW phase velocity is determined as an implicit function of quasistatic gradients of displacement, electrical field, temperature, thicknesses of layers, orientation of layers and substrate, internal mechanical stresses in layers. The same values determine the factor of a substrate in sensitivity of a SAW phase velocity to loading a surface. The physical channel of change of a SAW phase velocity V_R^0 is characterized by the set of partial sensitivity indexes of a SAW phase velocity to changes of independent thermodynamic variables. In case of quasi-homogeneous volumetric and surface effects as last act deformation of a substrate η_{ij} , external electrical field E_i , temperature T and structure of ambient atmosphere (concentration a component N_k). The physical channel is representable by the way

$$dV_R(\eta', \vec{E}, T, N_1, \dots, N_M) = V_R^0 * [KДЧ_{ij} * d\eta_{ij} + KЭЧ_i * dE_i + KТЧ * dT + KГЧ_K * dN_K],$$

where the partial factors of deformation sensitivity of a SAW phase velocity ($KДЧ_{ij}$), sensitivity indexes to variations of an electrical field ($KЭЧ_i$), temperature ($KТЧ$) and sensitivity index to change of concentrations a component of an ambient carburizing gas ($KГЧ_K$) are entered.

The orientation control of $KДЧ$ for crystals of a titanate of strontium and quartz, $KТЧ$ of silicon is investigated. The obtained data in aggregate testify to a management efficiency by the SAW characteristics by means of selection of orientation of the waveguide, kind and shape of an imposed exposure. The control of $KТЧ$ and $KДЧ$ and their temperature coefficients by means of the characteristics of functional layers is shown by $Si/SiO_2/ZnO$, C/ZnO structures. The influencing of internal mechanical stresses in layers of SAW structures was studied for $Si/SiO_2/ZnO$ structures.

The influencing of external surface effects is esteemed simultaneously with partial sensitivity indexes of a SAW phase velocity. With other things being equal peak response to mass loading of a surface have SAW in waveguides from quartz single-crystal of YZ-, XZ-, XY- orientations. The XY-orientation are SAW least responsive in the waveguide from sapphire.

The analysis of influencing of a stuff of bonding on the characteristics ISMS demonstrates, that usage of copper metallization appears by more perspective as contrasted to by other materials. Usage of hyper- and superconductivity effects basically allows intellectualize metallization in a degree, sufficient for maintenance of integrating nanoelectronic processors and acoustoelectronic sensory components of ISMS.

The examples of implementation of sensory microsystems on SAW are presented. In a full kind the tendered approach can be realized only on the basis of creation of a CAD system for ISMS on SAW. For this purpose it is necessary to use the multifunctional approach to SAW structure design and model based predictive control of a SAW fields.

Наиболее многообещающей тенденцией в развитии сенсорики в настоящее время представляется разработка интеллектуальных сенсорных микросистем (ИСМС) на основе функциональной интеграции сенсорных, процессорных и исполнительных акустоэлектронных элементов в микроэлектронном исполнении. Переход к микро- и нано-размерным структурам приводит к расширению списка существенных физико-химических процессов, которые необходимо учитывать разработке новых типов сенсорных микроструктур. По мере усложнения решаемых процессором в реальном масштабе времени задач необходимо вводить новые структурные уровни и использовать более гибкие алгоритмы управления. Таким новым структурным уровнем сенсорных микросистем может являться акустическое поле поверхностных

акустических волн (ПАВ). Вследствие микронных размеров элементов ИСМС обсуждаются ПАВ в частотном диапазоне 100 МГц — 2 ГГц, что соответствует длинам ПАВ 1 — 30 мкм и площади ПАВ-структур 0,05 — 10 мм², при этом ПАВ-структуры попадают в размерную область технологии микро- и нано-электроники и микроэлектромеханики. Сенсорные микросистемы, в отличие от традиционных изделий микроэлектроники, еще на этапе проектирования должны рассматриваться как открытые системы, связанные со своим окружением несколькими каналами потоков энергии, вещества и информации, посредством которых осуществляется управление состоянием микросистем.

1. Управляющие параметры поля ПАВ в микро- и нано-электронных структурах

Задача управления характеристиками поля ПАВ и соответствующих ПАВ-структур весьма сложна и должна ставиться уже на этапе проектирования микросистем на ПАВ. В таблицу 1 сведены основные управляющие параметры ПАВ-систем, влияние и значения которых определяет характеристики качества последних. Проектирование сенсорных микросистем на ПАВ с необходимостью включает этап компьютерного моделирования, который лучше всего интегрировать в САПР ИСМС на ПАВ.

При использовании ПАВ-структур в качестве сенсорных элементов ИСМС основное значение имеет правильный выбор материалов и параметров акустического волновода с точки зрения характеристик чувствительности ПАВ к внешним воздействиям. Воздействия, затрагивающие весь объем волновода ПАВ, будем относить к *объемным управлениям* (механические деформации волновода, изменение температуры, плотности веществ), а воздействия, локализованные у поверхности волновода — к *поверхностным управлениям*.

Одной из важнейших характеристик контроля и управления полем ПАВ в сенсорных микросистемах является фазовый сдвиг f_{AB} поля ПАВ при ее распространении между точками А и В поверхности волновода. Эта величина играет ключевую роль в формировании частотных характеристик ПАВ-структур, в частности, задает время задержки в линиях задержки на ПАВ, определяет резонансную частоту ПАВ-резонаторов.

Внешние воздействия на ПАВ-структуру ведут к вариациям f_{AB} вследствие изменения волнового вектора ПАВ и искажений прямой L_{AB} . При этом f_{AB} можно представить в виде, инвариантном к внешним воздействиям:

$$\Phi_{AB} = \omega \int_0^L \frac{d\ell}{V_R(\ell)}, \quad (1)$$

где интегрирование ведется по прямой L_{AB} , взятой в отсутствие внешних воздействий, ℓ — собственная длина L_{AB} , L — длина L_{AB} , ω — круговая частота ПАВ. При этом $V_R(\ell)$ играет роль фазовой скорости ПАВ в нагруженном состоянии волновода.

Для вычисления V_R используются эффективные модули упругости, пьезомодули и компоненты тензора диэлектрической проницаемости, зависящие от температуры, квазистатических деформаций и электрического поля в волноводе. При этом фазовая скорость ПАВ V_R определяется как неявная функция квазистатических градиентов смещений, электрического поля, температуры, толщин слоев, ориентации слоев и подложки, внутренних механических напряжений в слоях

$$V_R = V_R(\bar{U}_{k,l}^{(Q)}, \bar{E}_k^{(Q)}, T, \sigma_{ii}^{(Q)}, H^{(Q)}, \lambda^{(Q)}, \mu^{(Q)}, \theta^{(Q)}). \quad (2)$$

(здесь Q пробегает значения $S, 1, \dots, N$, где N — число слоев сенсорной ПАВ-структуры). Эти же величины определяют фактор подложки в чувствительности фазовой скорости ПАВ к нагружению поверхности

$$f_M = 2\pi \frac{A+B+C}{\rho V_R}, \quad (3)$$

где ρ — плотность материала подложки, A, B, C — параметры волновода ПАВ, характеризующие распределение энергии ПАВ по глубине подложки.

Указанные зависимости скорости ПАВ и фактора подложки составляют основу алгоритмов управления и оптимизации ИСМС на ПАВ и определяются в результате численного моделирования.

2. Фазовая скорость ПАВ как термодинамическая величина

Любое внешние воздействия влияет на характеристики ПАВ только вследствие изменения термодинамического состояния волновода, которое определяется набором конечного числа независимых термодинамических переменных. Таким образом, все многообразие влияний на фазовую скорость ПАВ сводится к ее зависимости от относительно небольшого числа термодинамических функций. Кроме того, значение V_R зависит и от некоторых конструктивно-геометрических параметров волновода в отсутствие воздействий: толщины функциональных слоев, кристаллографической ориентации, кривизны поверхности, несущей ПАВ, а также других параметров, задаваемых произвольно.

С информационной точки зрения разделять вклады в изменение V_R указанных двух типов параметров неправомерно. Следует учитывать их одновременно, тогда взаимосвязь физических и конструктивных свойств преобразователей информации становится явной и может быть учтена в исчерпывающей форме.

В частности, в таком подходе можно определить понятие полного дифференциала фазовой скорости ПАВ. В символическом виде он представим как

$$dV_R = \frac{\delta V_R}{\delta[\text{Физ}]} d[\text{Физ}] + \frac{\delta V_R}{\delta[\text{Геом}]} d[\text{Геом}], \quad (4)$$

где $[\text{Физ}]$ обозначает набор термодинамических параметров, а $[\text{Геом}]$ — набор геометрических и конструктивных характеристик волновода. Преобразование информации идет по обоим этим каналам. Их согласованное рассмотрение позволяет ставить полную оптимизационную задачу для разработки прецизионных информационных систем контроля и управления на основе ПАВ-устройств.

Таблица 1

Параметры, учитываемые при проектировании ИСМС на ПАВ

<i>N</i>	<i>Управляющий параметр</i>	<i>Формальный параметр ПАВ</i>
1.	Материалы подложки и слоев	Химический и фазовый состав материала волновода, материальные константы $C_{MN}, C_{MNK}, \epsilon_{iN}, \epsilon_{iNK}, \epsilon_M, \epsilon_{ijk}, f_{MN}$, плотность ρ
2.	Ориентация подложки и слоев	Углы Эйлера $\lambda^{(S)}, \mu^{(S)}, \theta^{(S)}, \lambda^{(I)}, \mu^{(I)}, \theta^{(I)}$...
3.	Толщины слоев	Нормированные толщины слоев $kN_1, kN_2, \dots, k=2\pi/\lambda$
4.	Температура	Температурные зависимости материальных констант, плотности, толщин слоев, коэффициенты теплового расширения материалов, температурные напряжения в слоях, температурный коэффициент фазовой скорости ПАВ
5.	Внутренние механические напряжения	σ^0
6.	Металлизация поверхности волновода	коэффициент электромеханической связи, потери распространения
7.	Неоднородность волновода ПАВ	Коэффициенты отражения и преобразования ПАВ в объемные волны
8.	Деформации волновода	Коэффициенты деформационной чувствительности фазовой скорости ПАВ
9.	Вращения в волноводе	Коэффициенты чувствительности фазовой скорости ПАВ к вращениям в волноводе
10.	Внешнее электрическое поле	Коэффициенты чувствительности фазовой скорости ПАВ к электрическому полю
11.	Адсорбции из газового окружения	Коэффициенты чувствительности фазовой скорости ПАВ к изменению концентраций газовой смеси
12.	Затухание ПАВ	Коэффициент затухания ПАВ
13.	Акустоэлектронное взаимодействие	Коэффициент увлечения ПАВ
14.	Поглощение ПАВ	Коэффициент поглощения ПАВ
15.	Излучение энергии во внешнюю среду	Коэффициент потерь на излучение
16.	Генерация гармоник ПАВ и другие нелинейные эффекты взаимодействия	Амплитудные коэффициенты нелинейных взаимодействий
17.	Преобразователи для возбуждения и приема ПАВ	Частотные характеристики преобразователей
18.	Электрические схемы согласования ПАВ-структур с внешними цепями	Параметры элементов схем согласования
19.	Напряжение питания электрической схемы с ПАВ структурой	Режимная нестабильность ПАВ-генераторов
20.	Шумы	Уровень шумов, отношение сигнал/шум
21.	Характеристики микропроцессорной подсистемы	Электрические и информационные характеристики сигнала ПАВ-структур

Физический канал изменения фазовой скорости ПАВ в соответствии с вышесказанным можно охарактеризовать совокупностью парциальных коэффициентов чувствительности (ПКЧ) фазовой скорости ПАВ к изменению независимых термодинамических переменных. В случае квазиоднородных квазистационарных объемных и поверхностных воздействий в качестве последних выступают чаще всего деформация подложки η_{ij} , внешнее электрическое поле E_i , температура T и состав окружающей атмосферы (концентрации компонент N_k). Физический канал представим поэтому в виде

$$dV_R(\eta', \vec{E}, T, N_1, \dots, N_M) = V_R^0 * [KДЧ_{ij} * d\eta_{ij} + KЭЧ_i * dE_i + КТЧ * dT + КГЧ_K * dN_K],$$

где введены парциальные коэффициенты деформационной чувствительности фазовой скорости ПАВ ($KДЧ_{ij}$), коэффициенты чувствительности к вариациям электрического поля ($KЭЧ_i$), коэффициент температурной чувствительности ($КТЧ$) и коэффициент чувствительности к изменению концентраций компонент окружающей газовой атмосферы ($КГЧ_K$). Фазовая скорость ПАВ в начальном состоянии V_R^0 и парциальные коэффициенты чувствительности, вообще говоря, зависят от всех физических и конструктивно-геометрических факторов, входящих в (3). Поэтому их вычисление сопряжено с определенными трудностями.

Следует отметить, что обычно каждое внешнее воздействие на волновод ПАВ влияет на V_R не по одному, а по нескольким физическим каналам, одновременно меняя значения нескольких термодинамических переменных. Отклик фазовой скорости на данное воздействие можно поэтому представить в виде

$$dV_R = \gamma * dy, \quad (6)$$

где через y обозначена характерная для данного воздействия физическая величина, а через γ — соответствующий коэффициент чувствительности. Тогда

$$\gamma = KДЧ_{ij} \frac{\delta\eta_{ij}}{\delta y} + KЭЧ_i \frac{\delta E_i}{dy} + КТЧ \frac{\delta T}{dy} + КГЧ_K \frac{\delta N_K}{dy}. \quad (7)$$

Таким образом, коэффициент чувствительности фазовой скорости ПАВ к данному воздействию представляется в виде линейной комбинации вкладов от каждого независимого термодинамического параметра. Это позволяет ставить задачу оптимизации структуры волновода по величине чувствительности ПАВ к данному виду воздействия. Целью такой оптимизации может быть, в частности, поиск структур волновода, обеспечивающих заданную чувствительность ПАВ-устройств к данному воздействию или определение условий взаимной компенсации различных воздействий.

3. Объемное управление

Для объемных квазиоднородных и квазистатических воздействий фазовая скорость ПАВ в подложке может рассматриваться как термодинамическая функция состояния приповерхностного слоя материала волновода толщиной в несколько длин ПАВ и функция кристаллографической ориентации волновода.

3.1. Ориентационное управление

Для исследования влияния кристаллографической ориентации волновода на характеристики акустического поля ПАВ необходимо использовать численный алгоритм. Рассчитывались коэффициенты деформационной чувствительности КДЧ для случаев продольного и поперечного по отношению к направлению ПАВ нагружения волновода в конфигурации консоли, которая используется для построения сенсоров механических величин и актюаторов с контролем на ПАВ. Представленные данные свидетельствуют о том, что КДЧ обладают собственными экстремумами, не сводящимися к экстремумам фазовой скорости ПАВ, и поэтому информационно более емки, чем V_R .

На рис.1,2 в качестве примера представленные данные по ориентационной зависимости фа-

Таблица 2
Коэффициент температурной чувствительности фазовой скорости ПАВ КТЧ (К⁻¹) в монокристаллическом кремнии

Ориентация волновода	Температурный диапазон, К			
	293-373	373-473	473-573	573-673
{001}<100>	-2,956·10 ⁻⁵	-2,775·10 ⁻⁵	-3,195·10 ⁻⁵	-3,256·10 ⁻⁵
{001}<110>	-3,049·10 ⁻⁵	-2,607·10 ⁻⁵	-3,152·10 ⁻⁵	-3,280·10 ⁻⁵
{111}<011>	-3,015·10 ⁻⁵	-3,136·10 ⁻⁵	-2,919·10 ⁻⁵	-2,977·10 ⁻⁵
{111}<112>	-3,031·10 ⁻⁵	-2,884·10 ⁻⁵	-3,030·10 ⁻⁵	-3,124·10 ⁻⁵
{110}<110>	-2,995·10 ⁻⁵	-3,133·10 ⁻⁵	-2,922·10 ⁻⁵	-2,922·10 ⁻⁵

зовой скорости ПАВ и КДЧ для кристаллов титаната стронция и кварца, а в таблице 2 - данные об ориентационной зависимости КТЧ для монокристаллического кремния в нескольких температурных диапазонах. Полученные данные в совокупности свидетельствуют об эффективности управления характеристиками ПАВ посредством выбора ориентации волновода, вида и формы налагаемого внешнего воздействия.

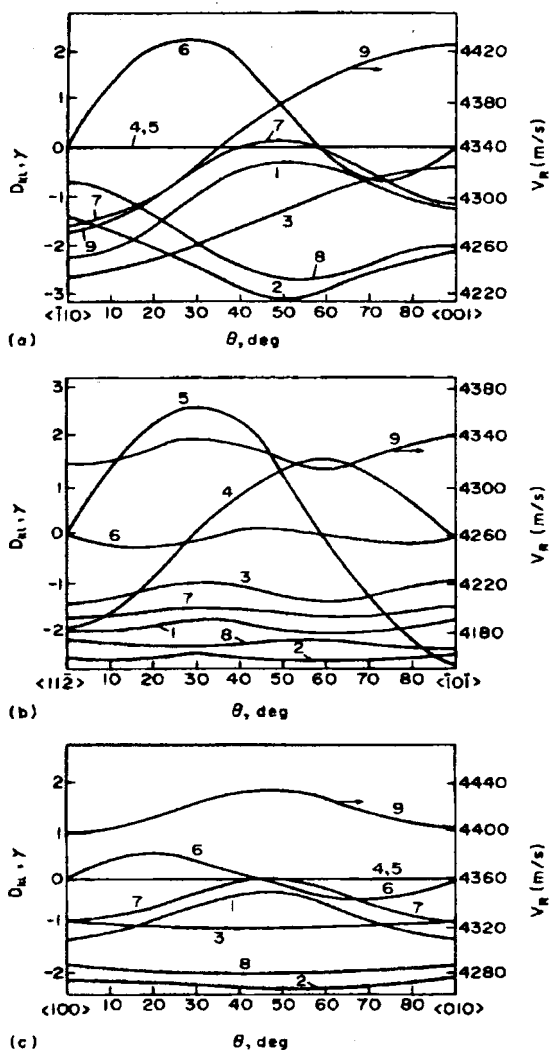


Рис. 1. ПАВ в $SrTiO_3$. а) $\{110\}$ $SrTiO_3$; б) $\{111\}$ $SrTiO_3$; в) $\{001\}$ $SrTiO_3$. 1- $KДЧ_{11}$; 2- $KДЧ_{22}$; 3- $KДЧ_{33}$; 4- $KДЧ_{23}$; 5- $KДЧ_{13}$; 6- $KДЧ_{12}$; 7- $KДЧ$; 8- $KДЧ_n$; 9- $V_{ПАВ}$

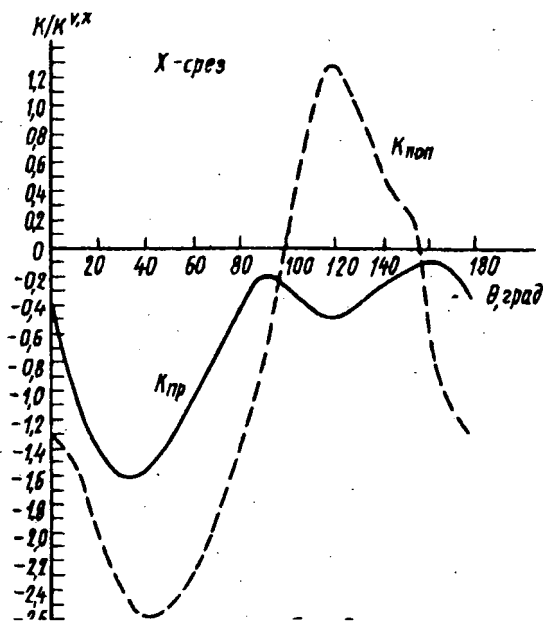
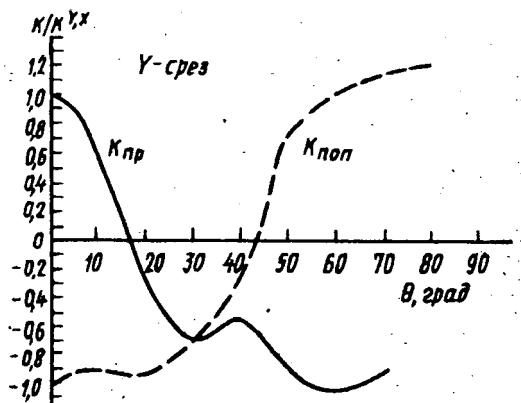


Рис. 2. Тензоэффект на кварце

3.2. Управление ПАВ посредством характеристик функциональных слоев.

Функциональные слои, вносимые в поле ПАВ, используются в очень разнообразных целях. Это пьезоэлектрические и магнитострикционные слои для возбуждения ПАВ на непьезоэлектрических подложках, чувствительные слои в преобразователях концентрации газов, диэлектрические слои для подстройки резонансной частоты ПАВ-резонаторов, слои металлизации и резистивные слои для управления электрическим полем ПАВ, электрически и акустически нелинейные слои в нелинейных устройствах обработки сигналов на ПАВ.

Многослойные ПАВ-структуры характеризуются наличием нескольких мод ПАВ. ПАВ в этом случае обладают дисперсией, определяемой зависимостью их фазовой скорости от нормированных толщин слоев. Таким образом, влияние слоя на характеристики ПАВ зависит

от частотного диапазона ПАВ-структуры. Проведенные исследования показали, что толщина слоя является эффективным параметром управления характеристиками ПАВ в узком диапазоне. На рис.3 представлены зависимости фазовой скорости ПАВ, КТЧ и КДЧ при продольном нагружении звукопровода в конфигурации консоли и его температурного коэффициента ТСКДЧ от нормированной толщины слоя SiO_2 для основной моды ПАВ в структуре $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$ ориентации $\{001\}\langle 100\rangle$ при фиксированной толщине слоя ZnO , равной 0,03 $\mu\text{м}$ при температуре 293 К. На рис.4 представлены дисперсионные кривые C/ZnO для нескольких мод ПАВ в зависимости от нормированной толщины слоя ZnO .

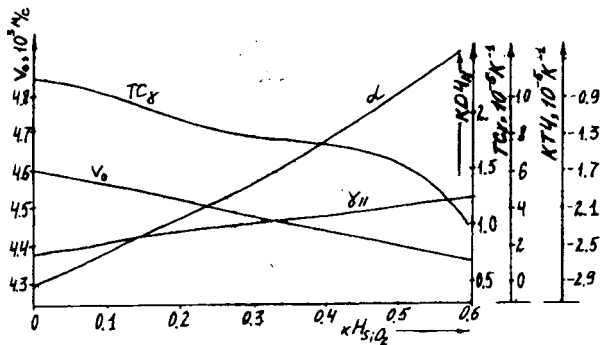


Рис. 3. Дисперсия фазовой скорости различных мод ПАВ в структуре C/ZnO

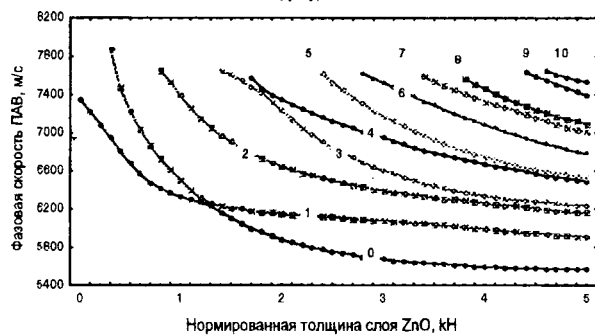


Рис. 4.

3.3. Влияние температуры.

Как уже отмечалось, температура оказывает влияние на характеристики ПАВ как вследствие температурной зависимости материальных констант и геометрических параметров ПАВ-структур (табл.2), так и вследствие температурных напряжений в слоях ПАВ-структур из-за различий коэффициентов теплового расширения материалов. На рис.5 представлены зависимости TCVR и TCKDЧ от температуры для структуры $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$ ориентации $\{001\}\langle 100\rangle$ при различных толщинах слоев. В целом температура оказывает на параметры ПАВ влияние, достаточное для его использования в ПАВ-преобразователях температуры.

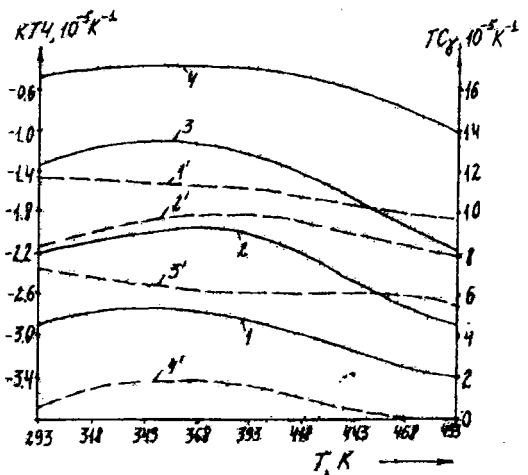


Рис. 5.

3.4. Влияние внутренних напряжений.

Влияние внутренних механических напряжений в слоях ПАВ-структуры подробно исследовалось для структуры $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$ как наиболее перспективной для использования в интегральных многофункциональных сенсорных элементах с микропроцессорной обработкой информации. Изучалось влияние напряжений как на фазовую скорость ПАВ, так и на коэффициенты деформационной и температурной чувствительности для ПАВ фундаментальной моды при различных толщинах слоев. Получены зависимости относительных изменений указанных величин от величины внутренних механических напряжений в слоях в диапазоне $-1\text{ ГПа} + 1\text{ ГПа}$ (рис.6,7). Указанное влияние можно использовать для контроля внутренней среды волновода ПАВ.

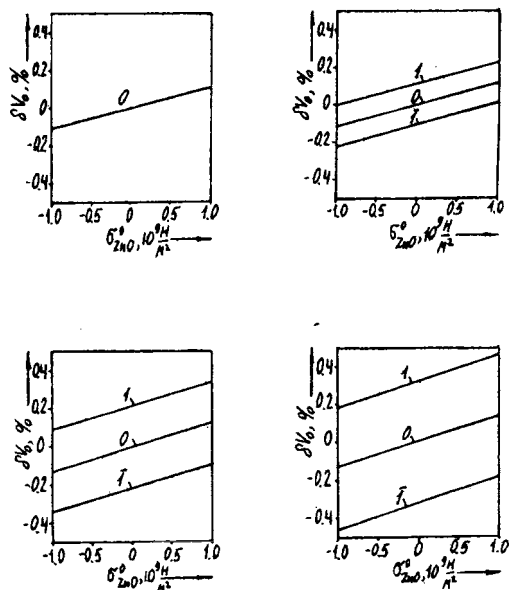


Рис.6.

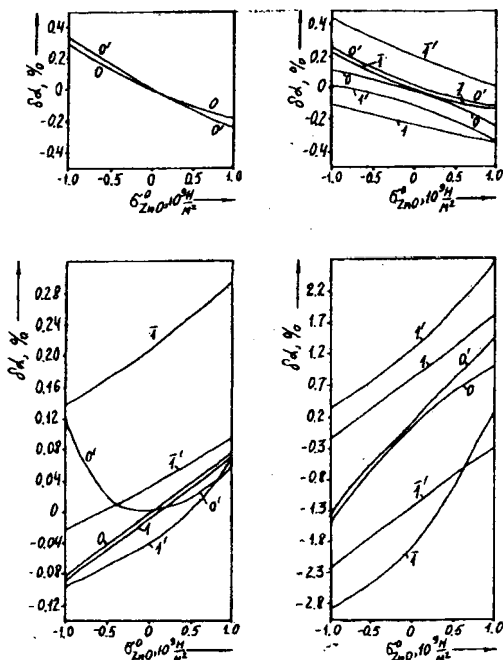


Рис. 7.

4. Поверхностное управление

В большинстве случаев влияние поверхностных воздействий сводится к изменению геометрических, электрических и упругих характеристик поверхностного слоя ПАВ-структуры, приводящих к локальному изменению фазовой скорости ПАВ. Например, в случае только массового нагружения фактор подложки изменяется резонансной частоты f автогенератора на ПАВ определяется соотношением

$$\Delta f/f = -f \cdot f_M \cdot \Delta m, \quad (5)$$

где m — поверхностная плотность, а фактор подложки дается (3). Эти параметры рассчитываются одновременно с парциальными коэффициентами чувствительности фазовой скорости ПАВ.

Из полученных данных следует, что при прочих равных условиях максимальной чувствительностью к массовому нагружению поверхности обладают ПАВ в волноводах из монокристаллического кварца Y,Z-, X,Z-, X,Y- ориентаций. Наименее чувствительны ПАВ в волноводе из сапфира X,Y-ориентацией. Отметим, что во всех исследованных случаях $A < B < C$.

Представленные данные позволяют просто оценивать изменение чувствительности фазовой скорости ПАВ к массовому нагружению поверхности при замене материала и ориентации подложки. В таблице 3 представлены данные по чувствительности ПАВ-преобразователей концентраций NO_2 , NH_3 , CO_2 , CO , H_2O , CH_4 с чувствительным слоем из фталоцианина толщиной 0,32 мкм и рабочей частотой ПАВ 236,85 МГц, полученные на основе данных по чувствительности аналогичного преобразователя из квар-

ца ST,X- ориентации. Положительные значения изменения частоты по отношению к концентрации легких газов (NH_3 , CO , H_2O , CH_4) можно объяснить имеющейся в этом случае десорбцией кислорода, захваченного из воздуха.

В случае неоднородного вдоль волнового фронта ПАВ чувствительного слоя может быть реализовано бездисперсионное управление характеристиками ПАВ во всей полосе пропускания ПАВ-структуры. Такое управление может быть перспективным в случае широкополосных устройств.

Следует заметить, что резонансная частота ПАВ-резонатора f является функцией времени t вследствие разнообразных процессов, протекающих на поверхности волновода и в материале электродов ПАВ-структуры.

5. Влияние металлизации

Слой металлизации в сенсорных структурах на поверхностных акустических волнах (ПАВ) используются для создания элементов, осуществляющих генерацию и прием ПАВ, а также элементов управления распространением ПАВ в пьезоактивных звукопроводах. Физической основой такого использования металлизированных участков звукопровода является эффект изменения характеристик распространения ПАВ при изменении распределения электрического потенциала и зарядов на поверхности звукопровода вследствие пьезоэлектрического эффекта.

Для возбуждения ПАВ в пьезоактивных звукопроводах обычно используются встречно-штыревые преобразователи (ВШП), образованные парами металлических электродов, наносимых на рабочую поверхность звукопровода, на которые подается переменное напряжение различной полярности. Период электродных структур определяет частоту генерируемой ПАВ, длина которой совпадает с периодом преобразователя или является его пространственной субгармоникой. Для уменьшения эффектов переотражения ПАВ в электродных структурах используют аподизированные преобразователи с различными законами взвешивания длины области пересечения электродов каждой пары.

При уменьшении толщины металлической пленки ее сопротивление обычно возрастает. Рост сопротивления, кроме нежелательных резистивных потерь в ВШП, приводит и к нарушению эквипотенциальности металлизированных участков, что вызывает искажение фазовых соотношений в волне и искажению волнового фронта ПАВ в направлении, перпендикулярном направлению распространения. Учет конечной электрической проводимости материала металлизации имеет важное значение и для снижения уровней шумов в ПАВ-устройствах. Были рассчи-

Таблица 3

Чувствительность ПАВ-преобразователей концентрации газов в воздухе $\Delta f/\Delta C$ (Гц/млн.часть) на частоте ПАВ 236.85 МГц при толщине чувствительного слоя фталоцианана 0,32 мкм

Материал под ложки	Ориентация	ΔC					
		100 млн. частей NO_2	200 млн. частей NH_3	3500 млн. частей CO_2	1200 млн. частей CO	8000 млн. частей H_2O	400 млн. частей CH_4
Кварц	ST,X	-4.900	0.800	-0.01	0.03	0.02	0.200
	Z,X	-2.97	0.49	-0.006	0.018	0.012	0.12
	Y,Z	-8.15	1.33	-0.017	0.05	0.033	0.33
Сапфир	Z,X	-1.65	0.27	-0.003	0.01	0.007	0.07
	X,Z	-1.981	0.323	-0.004	0.012	0.008	0.081
	Y,X	-1.378	0.225	-0.003	0.008	0.006	0.056
	Y,Z	-1.986	0.324	-0.004	0.012	0.008	0.081
Ниобат Лития	Z,X	-3.235	0.528	-0.007	0.020	0.013	0.132
	Y,X	-3.467	0.566	-0.007	0.021	0.014	0.142
	X,Y	-3.213	0.525	-0.007	0.020	0.013	0.131
Кремний	X,Z	-6.048	0.988	-0.012	0.037	0.025	0.247
SiO_2 (пл.)		-8.451	1.380	-0.017	0.052	0.034	0.345
Германий	X,Z	-4.599	0.751	-0.009	0.028	0.019	0.188
Оксид Цинка	Y,Z	-2.022	0.330	-0.004	0.012	0.008	0.083
	Z,X	-2.567	0.419	-0.005	0.016	0.010	0.105

таны резистивные потери в двухэлектродном ВШП в случае металлизации из Al, Cu и аморфного углерода а-С для электродов различной длины и толщины в звукопроводах из кварца ST-среза и структуры $Si/SiO_2/ZnO$ в зависимости от длины свободного пробега электронов в случае металлов и удельного электрического сопротивления материала в случае а-С металлизации. Обычно используемые

параметры массивных металлов представлены в таблице 4 вместе с предельными значениями, известными в настоящее время для комнатной температуры и соответствующими сверхчистым монокристаллическим образцам Al и Cu. Минимальное электрическое сопротивление а-С в настоящее время составляет 0,1 Ом*см.

Таблица 4

Параметры материалов металлизации

Металл	Удельное сопротивление, 10^{-6} Ом*см	Длина свободного пробега электронов	Предельная длина свободного пробега электронов при гелиевых температурах
Al	2,70	32,9 нм	17,5 мкм
Cu	1,72	31,5 нм	31 мкм

Полученные результаты расчетов представлены на рис.8. Следует отметить, что полученные данные свидетельствуют о необходимости всемерно уменьшать электрическое сопротивление металлизации при переходе к нанометровому диапазону толщин, поскольку резистивные потери в ВШП оказываются слишком высокими. Использование медной металлизации оказывается во всех случаях более перспективным. Использование аморфного углерода в качестве металлизации весьма проблематично.

Основной механизм рассеяния электронов в тонких металлических пленках — фононный. Рас-

сеяние на поверхности близко к зеркальному. В этой связи необходимо развивать способы управления фононным рассеянием и использовать, в частности, гиперпроводящую металлизацию, особенно в слоистых ПАВ-структурах, где резистивные потери в ВШП растут при уменьшении толщины электродов существенно быстрее (рис.9). В частности, одним таким механизмом управления фононным рассеянием является перевод металлизации в сверхпроводящее состояние. Таким образом, возможность управления механизмами рассеяния электронов в материале металлизации ВШП, в частности, использование эффектов гипер-

Металлизация толщиной 10 нм на ST-кварце

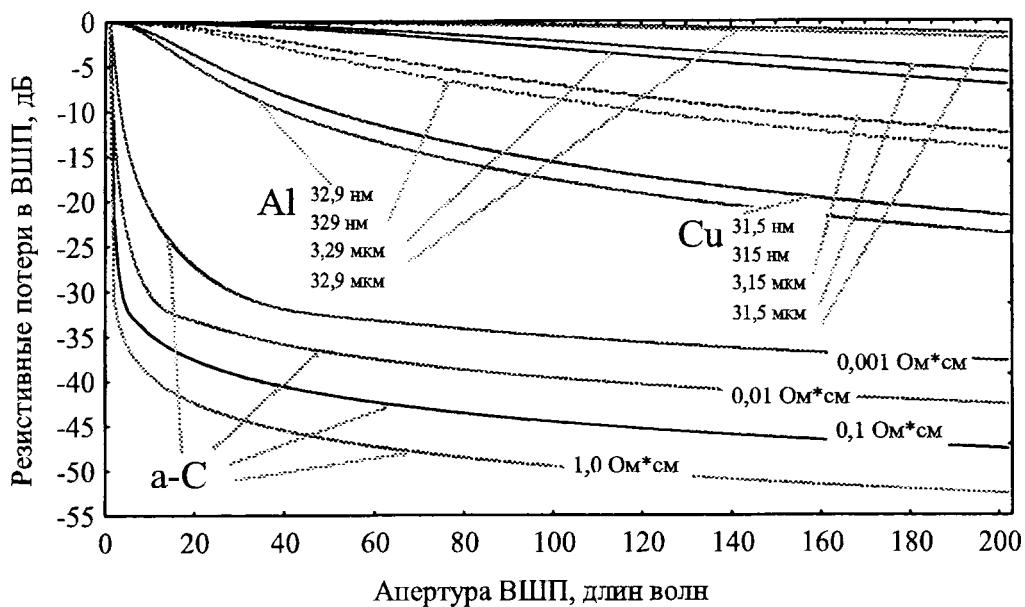


Рис. 8.

Cu metallization thickness 10 nm in $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{ZnO}_{(001)}\{100\}$

$$k_{\text{H}_{\text{ZnO}}} = 2,9; k_{\text{H}_{\text{SiO}_2}} = 0,0314$$

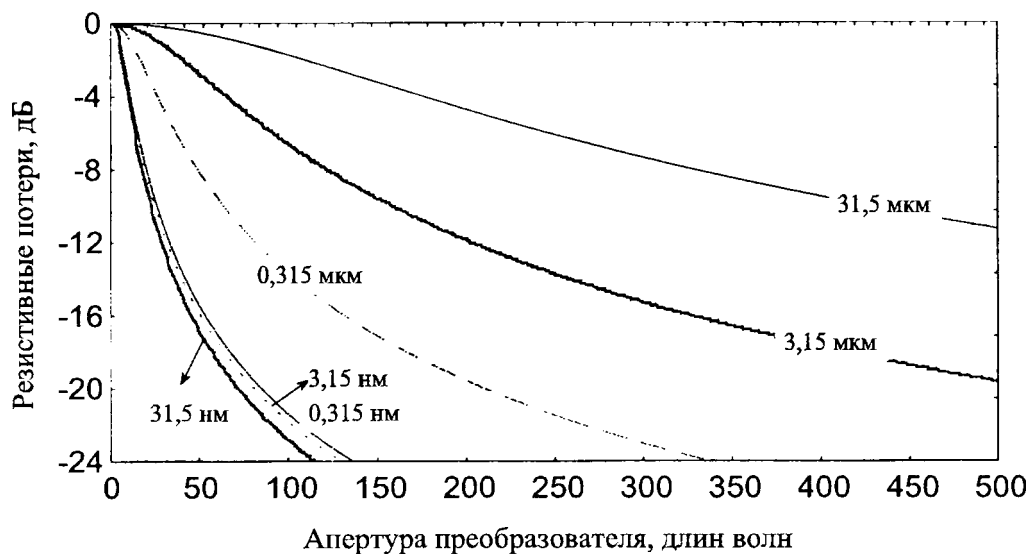


Рис. 9.

сверхпроводимости, в принципе позволяет «интеллектуализировать» эти материалы в степени, достаточной для обеспечения технологической интеграции нанoeлектронных процессорных и акустоэлектронных сенсорных элементов.

6. Заключение

Представленные данные свидетельствуют о том, что состояние поля ПАВ в сенсорных микросистемах действительно аккумулирует информацию о наиболее важных параметрах самой сис-

темы и ее окружения. Для использования этой информации необходимо использовать многофункциональный подход к разработке ПАВ-структур и управление полем ПАВ по принципу прогнозирования на основе математических моделей. На рис.10 представлены некоторые из разработанных в соответствии с предложенным подходом ИСМС. В полном виде этот подход может быть реализовать на основе создания САПР ИСМС на ПАВ.

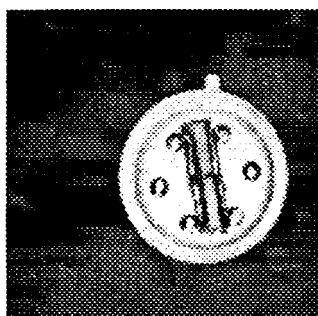
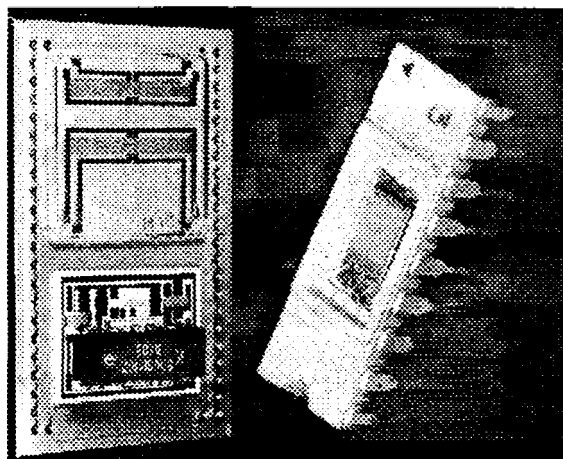


Рис. 10

ЛИТЕРАТУРА:

1. Преобразователь механических величин (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) - авторское свидетельство СССР N 1634063.
2. Преобразователь механических величин (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) - авторское свидетельство СССР N 1634111.
3. Преобразователь давления (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) - авторское свидетельство СССР N 1572187.
4. Преобразователь механических величин (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) - авторское свидетельство СССР N 1378721.
5. Преобразователь механических величин (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) - авторское свидетельство СССР N 1426400.
6. Преобразователь механических величин (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) - авторское свидетельство СССР N 1410642.
7. Устройство на поверхностных акустических волнах (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) - авторское свидетельство СССР N 1436831.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ДВИЖЕНИЙ В КУБИЧЕСКИ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ НА БАЗЕ МЕТОДА ХАРАКТЕРИСТИК

Босяков С.М.

The expressions for velocities of propagation of elastic waves are obtained, and also for coordinates of points of cubic anisotropic medium, up to which the wave perturbation has reached. With their help the wave surface and surface of inverse velocities of quasitransversal waves is constructed.

Формирование наглядных физико-механических представлений о закономерностях поведения объемных упругих волн в анизотропных средах является важной и актуальной задачей механики деформируемого твердого тела [1]. С этой

целью используются различные поверхности, характеризующие распространение волн в сплошных средах, например, поверхности обратных скоростей, волновые поверхности и др. [2—4]. Однако для большинства анизотропных сред их