

Рисунок 2 – Результат оптимизации-ОПСА «плавающего» типа

### Выводы

После проделанной работы логичным является пересмотр конструкции существующей ОПСА, но это вызывает ее глобальное изменение, что не является приемлемым в условиях существующего производства. Поэтому предложено изменить конструкцию ОПСА на полученную при оптимизации с ограничением по размещению.

УДК 621.3.049.77.002.5 : 620.22

В.М. Колешко, В.В. Баркалин, Е.В. Полынкова

## “УМНЫЕ” МАТЕРИАЛЫ СЕНСОРНЫХ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

С точки зрения общей теории систем наиболее многообещающей тенденцией сенсорики в настоящее время представляется разработка интеллектуальных микроэлектромеханических систем (МЭМС) на основе функциональной интеграции сенсорных, процессорных и исполнительных элементов в микроэлектронном исполнении. Доведение степени интеграции до уровня функциональной в принципе позволяет реализовать такие интеллектуальные свойства МЭМС как самоконтроль и адаптация текущего состояния системы к состоянию ее внешней и внутренней среды. Переход к микро- и нано-размерным структурам приводит к расширению списка существенных физико-химических процессов и "умных" материалов, которые можно использовать при разработке новых типов МЭМС, включающих элементы, традиционно относящиеся к функциональной акустоэлектронике в частности, МЭМС на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

Одной из важнейших характеристик поля ПАВ, определяющей распределение энергии ПАВ в пространстве, является ее фазовый набег  $\varphi_{AV}$  при распространении ме-

жду точками А и В поверхности звукопровода, рассматриваемый как функция начальной и конечной координаты. 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, а ее относительное изменение в результате воздействий на звукопровод является мерой их интенсивности в сенсорных устройствах на ПАВ. Ее значение определяется тем фактом, что для эффективного возбуждения, трансформации и детектирования ПАВ расположение элементов ПАВ-структуры должно соответствовать определенным фазовым соотношениям в поле ПАВ. В частности, электроды встречноштыревых преобразователей (ВШП) и многополосковых ответвителей, служащих этим целям, следует располагать параллельно поверхностям постоянной фазы ПАВ [1].

В случае монохроматической инфинитезимальной ПАВ набег фазы можно записать в виде

$$\phi_{AB} = \phi_B - \phi_A = \int_{\Lambda_{AB}} \vec{\nabla} \phi_P \cdot d\vec{x}_P = \int_{\Lambda_{AB}} \vec{k} \cdot d\vec{x}_P, \quad (1)$$

где  $\vec{k}$  - заданный волновой вектор ПАВ,  $\phi_A$  и  $\phi_B$  - значения фазы ПАВ на поверхностях постоянной фазы, проходящих через точки А и В соответственно, а интегрирование ведется по прямой  $L_{AB}$ , соединяющей точки А и В,  $\vec{x}_P$  - радиус-вектор точки  $P \in \Lambda_{AB}$ . Внешние воздействия на ПАВ-структуру ведут к вариациям фазового набега вследствие изменения волнового вектора ПАВ и искажений линии  $L_{AB}$  (предполагается, что масштаб пространственных неоднородностей внешних воздействий по всем направлениям гораздо больше длины ПАВ  $\lambda$ ). При этом  $\phi_{AB}$  можно представить в виде, инвариантом к внешним воздействиям:

$$\phi_{AB} = \omega \int_0^L \frac{d\ell}{V_R(\ell)}, \quad (2)$$

где интегрирование ведется по линиям  $L_{AB}$ , взятой в отсутствие внешних воздействий на звукопровод,  $\ell$  - внутренний параметр  $L_{AB}$  (собственная длина),  $L$  - длина линии  $L_{AB}$ ,  $\omega$  - круговая частота ПАВ. При этом  $V_R(\ell)$  играет роль фазовой скорости ПАВ в нагруженном состоянии звукопровода. Для вычисления  $V_R$  используется метод эффективных материальных констант.

Температурная зависимость характеристик ПАВ определяется температурной зависимостью материальных модулей, плотности, толщин слоев, а также температурными напряжениями в слоях и подложке, возникающими вследствие различия коэффициентов теплового расширения. 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. Таким образом ПАВ-структуры по самой своей природе чувствительны к самым разным параметрам внешней среды и состоянию звукопровода, причем их чувствительность зависит от его кристаллографической ориентации и толщины слоев.

При использовании ПАВ-структур в качестве сенсорных элементов МЭМС основное значение имеет правильный выбор "умных" материалов и параметров звукопровода с точки зрения характеристик чувствительности фазовой скорости ПАВ к внешним воздействиям. При этом часто оказывается, что в большинстве случаев величина коэффициентов чувствительности определяется параметрами подложки, а слои оказывают модулирующее влияние, величина которого определяется их толщиной. В этой связи для анализа чувствительности ПАВ-структур существенное значение имеет определение вклада подложки в чувствительность к тому или иному воздействию.

В случае рэлеевской моды ПАВ, когда звукопровод подвергается воздействию только диагональных градиентов смещений, скорость ПАВ для ориентации звукопровода  $(001)\langle 100\rangle$ ,  $(110)\langle 001\rangle$ ,  $(001)\langle 110\rangle$ ,  $(110)\langle 110\rangle$  кристаллов кубической сингонии зависит только от эффективных модулей  $C_{1111}$ ,  $C_{1331}$ ,  $C_{1313}$ ,  $C_{3113}$ ,  $C_{3333}$ ,  $C_{1133}$ . Для звукопроводов ориентации  $\{001\}\langle 100\rangle$  нормированный квадрат фазовой скорости ПАВ  $\nu = \frac{\rho_0 V^2}{C_{55}}$  и нормированные коэффициенты чувствительности

$$\frac{C_{11}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1111}}; \frac{C_{11}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{3333}}; \frac{C_{13}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1133}}; \frac{C_{55}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{3113}}; \frac{C_{55}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{3131}}; \frac{C_{55}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1331}} \quad (2)$$

определяются двумя параметрами: коэффициентом анизотропии материала звукопровода  $\eta = \frac{2C_{55}}{C_{11} - C_{12}}$  и параметром  $a = \frac{C_{11}}{C_{55}}$ .

Отметим, что при  $\eta > 2,5$  определяющей является зависимость нормированных производных фазовой скорости ПАВ по модулям упругости от коэффициента анизотропии. При близких значениях  $\eta$  близки и величины нормированных производных. С ростом  $\eta$  растут и абсолютные величины последних. В то же время при фиксированном коэффициенте анизотропии абсолютные величины нормированных производных слабо зависят от  $a$ .

Из термодинамических неравенств следует, что  $C_{55} > 0$ ,  $1/2C_{11} < C_{13} < C_{11}$ . Тогда для переменных  $a$ ,  $\eta$  получаем  $\eta > 2/a$ ;  $a > 1/\eta$ ;  $0 < A < a^2$ . Первое условие ограничивает снизу величины производных фазовой скорости ПАВ по модулям упругости. Если межатомное взаимодействие определяется только центральными силами, то справедливо соотношение Коши  $C_{55} = C_{13}$ . Тогда  $A = a^2 - 1$ ,  $\eta = 2/a - 1$ . Таким образом, условие  $\eta = 2/a$  ограничивает влияние нецентральных взаимодействий на коэффициент анизотропии. В то же время кристаллы с коэффициентом анизотропии  $\eta < 0,2$  неизвестны. Поэтому диапазоны  $0,2 < \eta < 10$ ,  $1 < a < 10$  заключают в себе достаточно представительный класс кубических кристаллов:

$$\begin{aligned} \frac{C_{55}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1331}} &= 0.120\eta + 0.020(e^{-1.1564(a-2)} - 1); & \frac{C_{55}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{3113}} &= 0.1267\eta + 0.0362(e^{-0.6671(a-2)} - 1); \\ \frac{C_{55}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1313}} &= -0.253\eta - 0.0704(e^{-0.6489(a-2)} - 1); & \frac{C_{11}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1111}} &= 0.1267a\eta + 0.02816a(e^{-0.6489(a-2)} - 1); \\ \frac{C_{11}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{3333}} &= 0.1267a\eta - 0.0701a(e^{-0.7799(a-2)} - 1); & \frac{C_{12}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1133}} &= -0.2517a\eta + 0.2202a(e^{-0.8636(a-2)} - 1) \end{aligned} \quad (3)$$

На рис.1 показано распределение “умных” материалов в плоскости  $(a, \eta)$ . Сплошная линия соответствует предельному значению  $a = 2/\eta$ . Видно, что изученные материалы концентрируются в области  $2 < a\eta < 7$ . В то же время для прогнозирования характеристик ПАВ-устройств на основе новых “умных” материалов важно заранее знать значение парциальных коэффициентов чувствительности к различным воздействиям.

В связи с этим были рассчитаны величины нормированных частных производных фазовой скорости ПАВ по модулям упругости в зависимости от  $a$  и  $\eta$  в диапазонах  $0 < \eta \leq 12$ ,  $2/\eta < a < 10$ . В диапазоне  $\eta > 3$  зависимости указанных величин от  $a$  при фиксированном  $\eta$  довольно слабы. С высокой точностью их можно представить как

Эти выражения (3) можно использовать для вычисления парциальных коэффициентов чувствительности фазовой скорости ПАВ DCV11, DCV22, DCV33 к компонентам тензора деформаций  $\eta_{11}$ ,  $\eta_{22}$ ,  $\eta_{33}$  и SCV11, SCV33 к соответствующим компонентам

тензора статических напряжений, а также TCV. Некоторые из рассчитанных таким образом величин представлены в таблице 1.

Таблица 1. Парциальные коэффициенты чувствительности фазовой скорости ПАВ для ориентации  $\{001\}\langle 100\rangle$  звукопроводов из материалов кубической сингонии

Материал	DCV11	DCV22	DCV33	SCV11, $10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$	SCV33, $10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$	TCV, $10^{-5} \text{ К}^{-1}$
Si	-1,511	-0,882	-0,647	0,886	0,309	-2,956
Ge	-1,661	-1,218	-0,791	1,090	0,405	-3,887
GaAs	-1,55	-1,232	-0,742	1,274	0,512	-5,291
SiO <sub>2</sub> (II)	1,57	1,491	2,117	1,953	0,425	8,565
ZnSe				2,075	1,011	-5,738
KBr				9,995	0,298	-4,700
KCl				8,170	0,268	-7,031
CsI				8,698	0,916	-49,382
KI				13,444	0,334	-6,957
PolySi				1,013	0,202	-2,342
NaCl	-2,936	0,100	-1,744	4,332	0,486	-1,328
NaF	-2,633	0,081	-1,472	1,999	0,262	-11,921
CsBr				7,684	0,998	-46,618

Рекордным по величине деформационной чувствительности фазовой скорости ПАВ является сверхпроводящая керамика  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  и алмазоподобные пленки, что связано с большим значением коэффициента акустической нелинейности этих материалов.

Введение производных фазовой скорости ПАВ по модулям упругости позволяет непосредственно связать величину чувствительности фазовой скорости ПАВ с характеристиками межатомных сил. Поскольку величины нормированных частных производных

$\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{ijke}} C_{ij}$  определяются в основном величиной коэффициента анизотропии  $\eta$ , то

определяющим для них фактором будут величины тех характеристик межатомных сил, которые определяют и величину  $\eta$ . В соединениях ряда  $\text{A}_N\text{B}_{8-N}$  это в первую очередь степень ионности связей  $f_i$ , при этом следует учитывать, что зависимость  $\eta$  от  $f_i$  распадается на две ветви. В диапазоне  $0 \div 0,654$  коэффициент анизотропии монотонно растет с ростом ионности, принимая значения в диапазоне  $1,65 \div 2,3$ . В диапазоне ионностей  $0,65 \div 0,785$  скорость роста резко увеличивается, достигая очень больших величин, а значение  $f_i = 0,785$  является критическим. При этом значении ионности коэффициент анизотропии становится бесконечно большим, что трактуется как неустойчивость соответствующей решетки. В диапазоне  $0,785 \div 1,0$  коэффициент анизотропии быстро падает от бесконечных значений до нуля (эта ветвь соответствует щелочногалоидным соединениям). Для кристаллов  $\text{MgO}$ ,  $\text{AgBr}$ ,  $\text{AgCl}$ , значение ионности которых близко к критическому, коэффициент анизотропии остается конечным и небольшим по величине. Из рассмотрения описанных зависимостей следует, что наибольшими значениями нормированных частных производных фазовой скорости ПАВ по модулям упругости обладают кристаллы со степенью ионности, близкой к критической ( $f_i^{\text{KP}} = 0,785$ ). В рассматриваемом ряду  $\text{A}_N\text{B}_{8-N}$  к ним относятся галогениды меди  $\text{CuI}$ ,  $\text{CuBr}$ ,  $\text{CuCl}$  ( $\eta = 3, 6, 12$ ) соответственно, соединения  $\text{A}_2\text{B}_6$ ,  $\text{ZnTe}$ ,  $\beta\text{-ZnSe}$ ,  $\text{CdTe}$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{CdSe}$  ( $\eta = 2,05, 2,3, 2,26, 2,39, 2,7, 2,8$ , соответственно).

Для ковалентных кристаллов с решеткой типа алмаза ( $f_i = 0$ ) коэффициент анизотропии и, следовательно, величины нормированных частных производных фазовой скорости ПАВ, определяется степенью металличности связей, которую можно характе-

ризовать главным квантовым числом  $n$  валентной оболочки атомов, образующих кристалл. С ростом  $n$  коэффициент анизотропии растет, что связано с увеличением металлизации связи, поэтому растут и величины нормированных частных производных фазовой скорости ПАВ по модулям упругости в ряду (C, -SiC, Si, Ge,  $\alpha$ -Sn).

Известно закономерное уменьшение коэффициента анизотропии с ростом степени нецентральности межатомных сил связи для всех исследованных кристаллов с решетками типа алмаза и сфалерита. Соответственно для таких кристаллов должно наблюдаться закономерное увеличение абсолютных значений нормированных частных производных фазовой скорости ПАВ с уменьшением ковалентности связей за счет роста их ионности или металличности вследствие ослабления нецентральных сил.

На рис.2 представлены ориентационные зависимости фазовой скорости и коэффициентов деформационной чувствительности (КДЧ) фазовой скорости ПАВ в плоскостях распространения  $\{110\}$ ,  $\{001\}$ ,  $\{111\}$  кристаллов арсенида галлия. Коэффициенты деформационной чувствительности рассчитывались для случаев продольного и поперечного по отношению к направлению ПАВ нагружению звукопровода в конфигурации консоли, которая используется в сенсорах 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  $V_R$  и , что фазовая скорость ПАВ как функция внешних воздействий может выполнять роль, аналогичную роли формальных нейронов в искусственных сетях, применяемых в сенсорных системах – суммированию с заданными весами внешних стимулов.

“Обучение” такого акусто-нейрона соответствует адекватному заданию парциальных коэффициентов чувствительности фазовой скорости ПАВ за счет выбора материала и ориентации звукопровода.

**Литература.** Колешко В.М., Мешков Ю.В. Микроэлектронные преобразователи информации на поверхностных акустических волнах.: - М.: Электроника, 1985.- 95с.

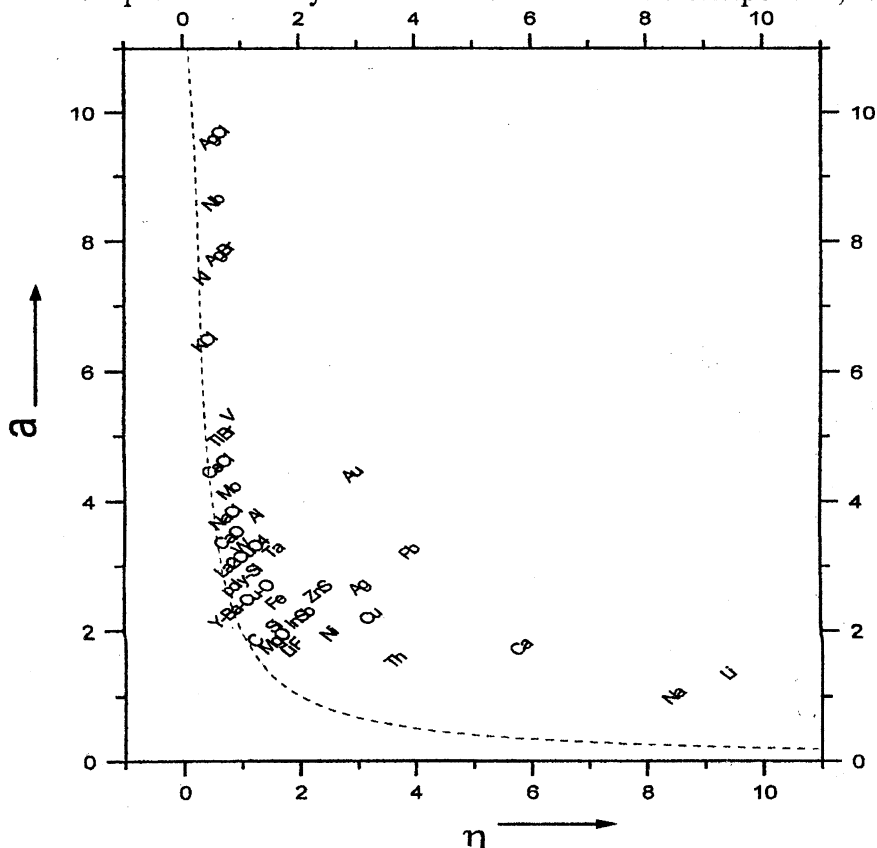


Рис.1 Распределение "умных" материалов в зависимости от анизотропии кристалла.

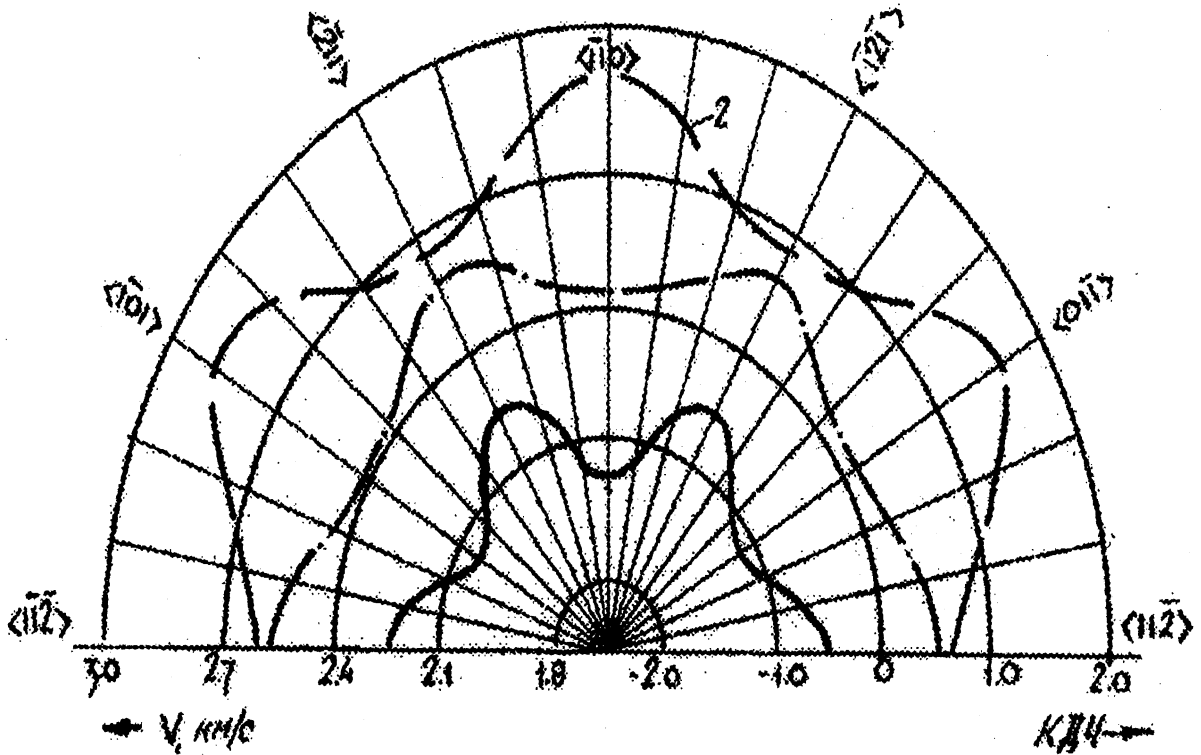


Рис.2 Диаграммы V и КДЧ в звукопроводах из монокристаллического арсенида галлия {111}.

1, 1', 1'' - V; 2, 2', 2'' - КДЧ<sub>||</sub>; 3, 3', 3'' - КДЧ<sub>⊥</sub>;  
1', 2', 3' - рэлеевская мода; 1'', 2'', 3'' - объёмная волна.

УДК 621.3.049.77

В.М. Колешко, В.В. Ковалевский

## ИЕРАРХИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МИКРОСИСТЕМ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

В то время как схемотехнические проблемы уходят на второй план, разработка топологии, верификация и тестирование становятся более критичными этапами проектирования интеллектуальных микросистем. Стремительное развитие микротехнологии (когда технологический процесс заходит ниже 0,13 микрон) затрудняет достижение требуемых временных характеристик и площади, а также интегрирование сигналов.

До недавнего времени, для достижения временной сходимости, применялся интегрированный синтез и размещение топологических блоков. Это позволяло топологии мегавентильной системы оставаться не иерархичной (flat design), и, таким образом, упрощать методологию САПР и минимизировать стоимость разработки. Однако при увеличении размера схемы возрастает количество итераций, т.е. требуется значительно больше времени, для операций размещения/трассировки, следующих за синтезом. Более того, сверх-субмикронный технологический процесс часто вносит новые, сложно решаемые проблемы в топологию — «целостность» сигнала, обусловленная емкостной связью (coupling capacitance) и индуктивными эффектами.