

– будут созданы условия извлечения из подсознания человека информации, что позволит человеку войти в новые общественно-экономические, социальные и биологические измерения.

Поэтому формирование инженера, технолога, ученого, будущего руководителя следует начинать сегодня [1, 2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Образовательный стандарт РД РБ 02100.5 ХХХ-99 высшего образования по специальности «Интеллектуальные приборы, машины, технологии и производства».
2. Образовательный стандарт РД РБ 02100.5 ХХХ-99 по специальности «Интегральные сенсорные системы».

УДК 621.37.39:534

В. М. Колешко, В. В. Баркалин, Е. В. Польшкова

УПРАВЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИМ ПОЛЕМ В МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМАХ

*Белорусская государственная политехническая академия
Беларусь, Минск*

Наиболее многообещающей тенденцией в развитии сенсорики в настоящее время представляется разработка интеллектуальных микроэлектромеханических систем (МЭМС) на основе функциональной интеграции сенсорных, процессорных и исполнительных акустоэлектронных элементов в микроэлектронном исполнении.

Переход к микро- и наноразмерным структурам приводит к расширению списка существенных физико-химических процессов, которые необходимо учитывать при определении управлений и можно использовать при разработке новых типов МЭМС. Интегрирующим уровнем МЭМС может являться акустическое поле поверхностных акустических волн (ПАВ).

Вследствие микронных размеров элементов МЭМС обсуждаются ПАВ в частотном диапазоне 100 МГц – 1 ГГц, что соответствует длинам ПАВ 3–30 мкм и площади ПАВ-структур 0,1–10 мм², попадающей в размерную область технологии микроэлектроники.

Задача управления полем ПАВ сложна и должна ставиться уже на этапе проектирования МЭМС на ПАВ. В табл. 1 сведены основные управляющие параметры ПАВ-систем, влияние которых определяет характеристики качества последних. Проектирование МЭМС на ПАВ включает этап компьютерного моделирования, который лучше всего интегрировать в САПР МЭМС на ПАВ.

Таблица 1.

Параметры, учитываемые при проектировании МЭМС на ПАВ

Управляющий параметр	Формальный параметр ПАВ
Материалы подложки и слоев	Химический и фазовый состав материала звукопровода, материальные константы C_{MN} $C_{Mnk}, \epsilon_{np}, \epsilon_{nk}, \epsilon_M, \epsilon_{np}^{(s)}, f_{MN}^{(s)}$, плотность ρ
Ориентация подложки и слоев	Углы Эйлера $\lambda, \mu, \theta, \lambda^{(1)}, \mu^{(1)}, \theta^{(1)}$...
Толщины слоев	Нормированные толщины слоев kN_1, kN_2, \dots $k=2\pi/\lambda$
Внутренние механические напряжения в слоях	σ^0
Неоднородность звукопровода ПАВ	Коэффициенты отражения и преобразования ПАВ в объемные волны
Металлизация поверхности звукопровода	Коэффициент электромеханической связи
Температура	Температурные зависимости материальных констант, толщин слоев, температурные напряжения в слоях. Температурный коэффициент фазовой скорости ПАВ TCV_R
Деформация звукопровода	Коэффициент деформационной чувствительности фазовой скорости ПАВ DCV_R
Вращения в звукопроводе	Коэффициент чувствительности фазовой скорости ПАВ к вращениям в звукопроводе RCV_R
Внешнее электрическое поле	Коэффициент чувствительности фазовой скорости ПАВ к электрическому полю ECV_R
Влияние адсорбции из газового окружения	Коэффициенты чувствительности фазовой скорости ПАВ к изменению концентраций CCV_R
Затухание ПАВ	Коэффициент затухания ПАВ
Усиление ПАВ электронным ветром	Коэффициент увлечения ПАВ
Поглощение ПАВ	Коэффициент поглощения
Акустическое и электромагнитное излучение ПАВ во внешнюю среду	Коэффициент потерь на излучение
Генерация гармоник ПАВ и другие нелинейные эффекты взаимодействия	Амплитудные коэффициенты нелинейных взаимодействий
Преобразователи для возбуждения и приема ПАВ	Частотные характеристики преобразователей
Электрические схемы согласования ПАВ-структур с внешними цепями	Параметры элементов схем согласования
Напряжение питания ПАВ – структуры	Режимная нестабильность ПАВ-генераторов
Шумы	Уровень шумов, отношение сигнал/шум
Характеристики микропроцессорной подсистемы	Электрические и информационные характеристики сигнала ПАВ-структур

При использовании ПАВ-структур в качестве сенсорных элементов МЭМС основное значение имеет правильный выбор материалов и параметров звукопровода с точки зрения характеристик чувствительности ПАВ к внешним воздействиям. Воздействия, затрагивающие весь объем звукопровода ПАВ, будем относить к *объемным управлениям*, а воздействия, локализованные у поверхности звукопровода – к *поверхностным управлениям*.

Одной из важнейших характеристик поля ПАВ является ее фазовая скорость V_R , играющая ключевую роль в формировании частотных характеристик ПАВ-структур. V_R определяется как неявная функция квазистатических градиентов смещений, электрического поля, температуры, толщин слоев, ориентации слоев и подложки, внутренних механических напряжений в слоях:

$$V_R = V_R(\hat{U}_{k,l}^{(Q)}, \hat{E}_k^{(Q)}, T, \sigma_{ii}^{(Q)}, H^{(Q)}, \lambda^{(Q)}, \mu^{(Q)}, \theta^{(Q)}). \quad (1)$$

Эти же величины определяют фактор подложки в чувствительности V_R к массовому нагружению поверхности:

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

где ρ – плотность материала подложки, A, B, C – параметры звукопровода ПАВ, характеризующие распределение энергии ПАВ по глубине подложки. Величины V_R и f_M составляют основу алгоритмов управления и оптимизации МЭМС на ПАВ и определяются в результате численного моделирования.

Для объемных воздействий V_R может рассматриваться как термодинамическая функция состояния приповерхностного слоя материала звукопровода толщиной в несколько длин ПАВ. Используя алгебраические свойства V_R как функции эффективных модулей упругости, через нормированные частные производные (НЧП) этой функции по модулям упругости можно определить ее полный дифференциал.

Наибольшими значениями НЧП обладают кристаллы со степенью ионности, близкой к критической ($f_i^{sp}=0,785$). К ним относятся галогениды меди CuI, CuBr, CuCl, соединения ZnTe, β -ZnSe, CdTe, CdS, CdSe.

Для ковалентных кристаллов с решеткой типа алмаза ($f_i=0$) НЧП определяются степенью металличности связей, которую можно характеризовать главным квантовым числом n валентной оболочки атомов, образующих кристалл. С ростом n коэффициент анизотропии растет, поэтому растут и величины НЧП в ряду (C, -SiC, Si, Ge, α -Sn).

Для исследования влияния кристаллографической ориентации звукопровода на характеристики ПАВ необходимо использовать алгоритм рис. 1. Полученные результаты свидетельствуют о том, что DCV обладают собственными экстремумами, не сводящимися к экстремумам V_R и поэтому информационно более емки.

В табл. 2 представлены данные об ориентационной зависимости TCV для монокристаллического кремния в нескольких температурных диапазонах.

Полученные данные в совокупности свидетельствуют об эффективности управления характеристиками ПАВ посредством выбора ориентации звукопровода, вида и формы налагаемого внешнего воздействия.

Многослойные ПАВ-структуры характеризуются наличием нескольких мод ПАВ и дисперсией, определяемой зависимостью V_R от нормированных толщин слоев, влияние слоя на характеристики ПАВ зависит от частотного диапазона ПАВ-структуры, толщина слоя является эффективным параметром управления характеристиками ПАВ в узком диапазоне изменений.

Температура влияет на характеристики ПАВ как вследствие температурной зависимости материальных констант и геометрических параметров ПАВ-структур, так и вследствие температурных напряжений в слоях. В целом температура оказывает на параметры ПАВ влияние, достаточное для его использования в ПАВ-преобразователях температуры.

Таблица 2

Коэффициент температурной чувствительности фазовой скорости ПАВ TCV (K^{-1}) в монокристаллическом кремнии

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

Влияние внутренних механических напряжений в слоях ПАВ-структуры исследовалось для структуры $Si/SiO_2/ZnO$ как наиболее перспективной для использования в интегральных многофункциональных сенсорных элементах с микропроцессорной обработкой информации. Указанное влияние можно использовать для контроля внутренней среды звукопровода ПАВ.

В большинстве случаев влияние поверхностных воздействий сводится к изменению геометрических, электрических и упругих характеристик поверхностного

слоя ПАВ-структуры, приводящих к локальному изменению V_R . Например, в случае массового нагружения фактор подложки (3) в изменении резонансной частоты f автогенератора на ПАВ определяется соотношением

$$\Delta f / f = -f \cdot f_M \cdot \Delta t \quad (4),$$

где t – поверхностная плотность слоя.

При прочих равных условиях максимальной чувствительностью к массовому нагружению поверхности обладают ПАВ в звукопроводах из монокристаллического кварца Y,Z-, X,Z-, X,Y-ориентаций. Наименее чувствительны ПАВ в звукопроводе из сапфира X,Y-ориентации.

Знание f_M позволяет просто оценивать изменение чувствительности VR к массовому нагружению поверхности при замене материала и ориентации подложки. В табл. 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 3 мкм и рабочей частотой ПАВ 78,95 МГц, полученные на основе данных по чувствительности аналогичного преобразователя из кварца ST,X-ориентации.

Таблица 3.

Чувствительность ПАВ-преобразователей концентрации газов в воздухе $\Delta f/\Delta C$ (Гц/млн.часть) на частоте ПАВ 78,95 МГц при толщине чувствительного слоя фталоцианина 3 мкм

Материал подложки	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
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

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.

УДК 621.37.39:534

В. М. Колешко, В. В. Баркалин, Е. В. Полянкова

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

*Белорусская государственная политехническая академия
Беларусь, Минск*

Созданные к настоящему времени преобразователи информации на поверхностных акустических волнах (ПАВ) можно определить как в основном однофункциональные (по принципу контроля внешнего воздействия) и как дискретные (по структуре размещения их акустических элементов). Эти преобразователи предназначены для контроля какой-либо одной физической или химической величины, и в их состав входит одна, иногда две включенные в дифференциальную схему микрорезисторные ПАВ-структуры.

Основной задачей, решаемой разработчиками однофункциональных дискретных преобразователей информации на ПАВ, является удовлетворение следующим двум требованиям: *обеспечение высокой чувствительности выходного сигнала к контролируемому воздействию и уменьшение чувствительности выходного сигнала к неконтролируемым.*

Вследствие взаимозависимости коэффициентов чувствительности характеристик ПАВ к воздействиям разной физической природы и многопараметрической