

Список литературы

1. Гуляев Ю В, Мансфельд Г Д *Успехи современной радиоэлектроники* (5–6) 13 (2004)
2. Мансфельд Г Д, Алексеев С Г *Радиотехника* (1) 75 (1998)
3. Lakin K M, in *Proc. of the 2002 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic Vol. 1*, p. 901
4. Мансфельд Г Д *Письма в ЖТФ* **23** (19) 35 (1997)
5. Bailey D S et al. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Frequency Control* **39** 780 (1992)
6. Кучерявая Е С и др. *Акуст. журн.* **41** 346 (1995)
7. Крутов Б Н, Мансфельд Г Д, Фрейк А Д *Акуст. журн.* **40** 633 (1994)
8. Мансфельд Г Д и др. *ФТТ* **37** 1097 (1995)
9. Mansfeld G, Alekseev S, Kotelyansky I, in *Proc. of the 2001 IEEE Intern. Symp. Frequency Control and PDA Exhibition*, p. 268
10. Mansfeld G D, Alekseev S G, Kotelyansky I M, in *Proc. of the 2001 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic Vol. 1*, p. 415
11. Мансфельд Г Д и др. *ФТТ* **44** 649 (2002)
12. Mansfeld G D, Kotelyansky I M, in *Proc. of the 2002 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic Vol. 1*, p. 909

PACS numbers: 07.07.Df, **72.50.+b**, 77.65.Dq

Многомодовые акустические датчики и системы

И.В. Анисимкин¹, В.И. Анисимкин

1. Введение

Усиление террористической опасности, загрязнение окружающей среды и распространение новых заболеваний поставили перед разработчиками электронных датчиков новые неотложные задачи. Одна из них — создание миниатюрных устройств для обнаружения малых концентраций вредных веществ, находящихся в смесях газов и жидкостей. Решение этой сложной и многодисциплинарной задачи проводится во многих научных лаборатории мира по нескольким альтернативным направлениям.

Среди датчиков акустического типа наибольшее распространение получили устройства на поверхностных акустических волнах Рэлея (ПАВ) (рис. 1). Малая глубина локализации (~ 10 мкм) делает эти волны особенно чувствительными к массовой нагрузке поверхности. Поэтому изменение свойств пленки, находящейся на пути распространения волны, вызывает изменение ее скорости v , фазы φ и амплитуды A , которые фиксируются на выходе устройства как вариации частоты или

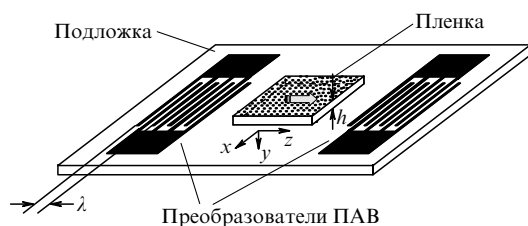


Рис. 1. Принципиальная схема одноканального газового датчика на поверхностных акустических волнах.

напряжения. Частотный вид отклика выгодно отличает акустические датчики от устройств иного типа, поскольку обеспечивает высокую точность измерений и простое совмещение с цифровыми системами обработки информации. Однако ни один из современных датчиков, в том числе и акустический, не способен в одиночку обеспечить селективное детектирование одного заданного газа, поскольку химических покрытий, реагирующих на одну газовую компоненту и не реагирующих на все остальные, создать не удается.

Решение проблемы было найдено путем создания приборов "электронный нос" и "электронный язык", подобных органам обоняния и вкусового восприятия животных и человека [1–3].

Главной составной частью этих приборов является так называемая решетка датчиков — набор из нескольких элементов с различной чувствительностью к одинаковым газовым компонентам. Различие между датчиками обеспечивается объединением в решетку устройств разного типа (например электросопротивлений, емкостей, полевых транзисторов, кварцевых микробалансов, устройств на ПАВ) и использованием в каждом датчике своего особого химического покрытия. Совокупность откликов, снимаемых с датчиков, подвергается специальной математической обработке, которая позволяет определить полный состав тестируемой смеси или ее принадлежность к одной из находящихся в базе данных. При таком подходе сенсорная решетка становится ключевым элементом всего прибора, от которого зависят его точность, разрешающая способность и стабильность. При этом возникает принципиальное противоречие: с одной стороны, чем больше сенсоров содержится в решетке и чем они разнообразнее, тем более совершенна работа электронного носа в целом; с другой стороны, чем больше датчиков и, следовательно, больше газочувствительных покрытий, тем менее стабильна работа всего прибора из-за старения пленок. Возникает вопрос: возможно ли создание решеток, содержащих одновременно большое число различных датчиков и малое число используемых в них химических покрытий?

Работая в этом направлении, сотрудники ИРЭ РАН предложили и разработали новый, чисто акустический подход. Ключевой идеей подхода является использование вместо одного сенсорного свойства и одного типа волн (как это было ранее, см. рис. 1) *всех свойств и всех акустических колебаний*, которые могут существовать в твердых телах. Действительно, поскольку в пьезокристаллах может распространяться до 10 волн разного типа, каждая из которых обладает своей реакцией на внешние воздействия, то, выбирая тип, количество и свойства волн, зондирующих среду, примыкающую к звукопроводу, можно сформировать требуемую совокупность откликов, даже не используя газочувствительные покрытия.

Аналогично можно решить другую прикладную задачу — измерить сразу несколько характеристик внешней среды или химико-биологического процесса. В этом случае используют несколько зондирующих волн, измеряют их характеристики и составляют систему уравнений, связывающую характеристики волн с параметрами среды. При числе уравнений, равном числу неизвестных, решение системы однозначно.

Продемонстрируем работоспособность нового подхода на конкретных примерах.

¹ Трагически погиб в результате террористического акта 9 декабря 2003 г. в центре Москвы.

2. Интегральная решетка ПАВ-датчиков.

Анализатор адсорбции из газовой фазы

Основой устройства является зависимость относительного изменения скорости ПАВ при адсорбции (отклика ПАВ $\Delta v/v$) как от свойств пленки-адсорбента (изменений плотности $\Delta\rho/\rho$, упругих модулей $\Delta c_{ij}/c_{ij}$, проводимости $\Delta\sigma/\sigma$ и температуры ΔT), так и от направления распространения волны на анизотропной подложке [4]. Эта зависимость позволяет объединить на одной подложке сразу несколько ПАВ-датчиков и использовать для них одну и ту же пленку-адсорбент (рис. 2а). Различие между датчиками в интегральной решетке (рис. 2б) обеспечивается анизотропией пяти зондирующих волн, по-разному "считывающих" изменения свойств пленки при

адсорбции. Решетка становится более компактной и технологичной, а дрейф ее откликов со временем ("старение") корректируется с помощью экспериментально измеренных вариаций со временем параметров $\Delta\rho/\rho$, $\Delta c_{ij}/c_{ij}$, $\Delta\sigma/\sigma$ и ΔT (см. ниже).

Измерение характеристик пленок при адсорбции проводится теми же пятью волнами, зондирующими пленку (рис. 2а). Из решения системы уравнений, связывающих отклики волн $\Delta v/v$ с характеристиками пленки ($\Delta\rho/\rho$, $\Delta c_{11}/c_{11}$, $\Delta c_{44}/c_{44}$, $\Delta\sigma/\sigma$, ΔT) находят временные изменения этих характеристик после подачи и отключения газа (рис. 2в), их равновесные значения и вариации равновесных значений с течением времени ("старение"). Точность измерений составляет 0,001 °С для перепадов температуры и 0,1 % для остальных величин. Разрешение во времени 1 с.

Применение интегральной решетки ограничено газообразными аналитами, так как при контакте с жидкостью поверхностные волны исчезают. Максимальное число датчиков в решетке ограничено пятью и не может быть увеличено из-за перекрытия соседних каналов и уменьшения разнообразия откликов. Для преодоления этих ограничений было предложено заменить ПАВ Рэлея нормальными модами в тонких пьезоэлектрических пластинах [5].

3. Акустические датчики на основе нормальных мод тонких пьезопластин

Длительное время нормальные моды в пластинах не находили практического применения, поскольку считалось, что для их возбуждения необходимы слишком толстые образцы с $h/\lambda \gg 1$ (h — толщина пластины, λ — длина волны). Однако недавние исследования [5–11] изменили это представление, продемонстрировав, что такое утверждение справедливо лишь для изотропных и слабоанизотропных материалов, тогда как в сильноанизотропных пьезоэлектриках число мод может достигать нескольких десятков даже при $h/\lambda \sim 1$ (рис. 3). Более того, нормальные моды пьезопластин оказались намного разнообразнее, чем в изотропных телах, а поскольку их энергия распределена по всей толщине пластины, они незначительно поглощаются жидкостью и могут использоваться для ее детектирования через верхнюю и нижнюю поверхности. Одним словом, этот тип акустических волн неожиданно выдвинулся в ряд наиболее привлекательных для использования в акустических датчиках различного назначения.

На рисунке 4а показан пример применения нормальных мод для детектирования жидкостей с одинаковой массой 378 мг, но с разной сдвиговой вязкостью η : воды ($\eta = 1,003$ мПа с) и глицерина ($\eta = 1450$ мПа с). Величины откликов (изменение вносимых потерь $\Delta ВП$) сильно зависят от номера моды n , причем по-разному для разных жидкостей. Следовательно, переключаясь с одной моды на другую (с одного датчика на другой), можно формировать требуемую совокупность выходных сигналов без использования чувствительных покрытий и без изменения направления распространения. Число откликов в такой решетке равно числу возбужденных мод и, как видно из сравнения с рис. 2б, на порядок выше полученного с использованием ПАВ.

То же устройство пригодно для детектирования слабых изменений состава жидкости по ее вязкости. С помощью моды, обладающей наибольшим различием

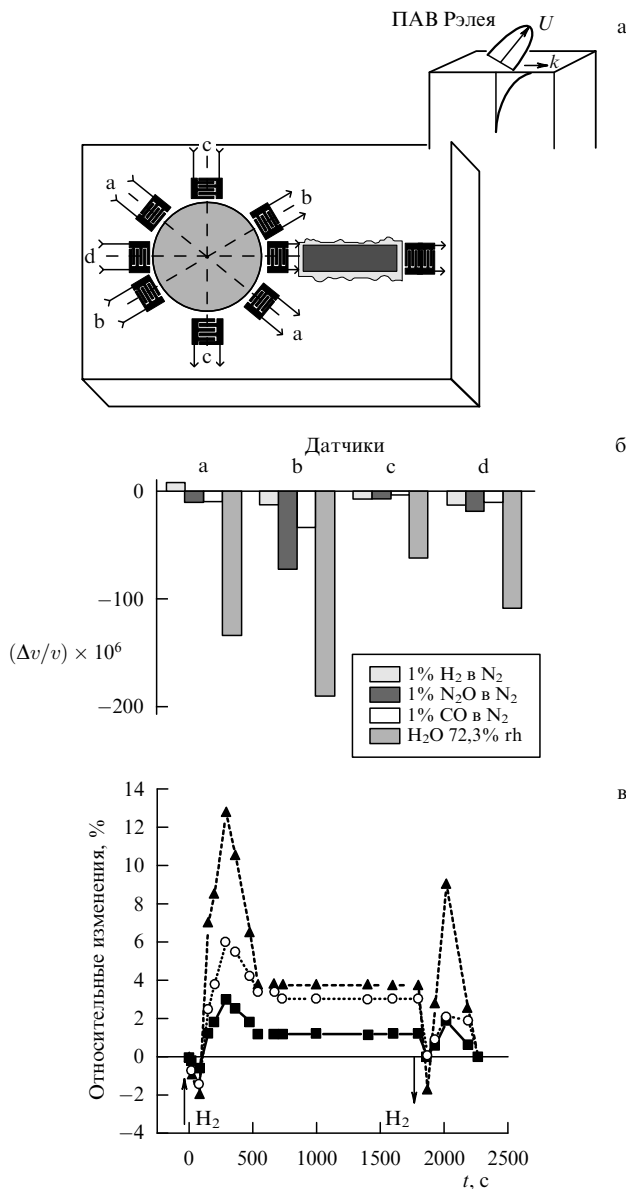


Рис. 2. Многоканальный газовый датчик на ПАВ (анализатор адсорбции): (а) принципиальная схема датчика; на вставке — ПАВ Рэлея; (б) газовые отклики ПАВ разных акустических каналов (датчиков); (в) временные изменения плотности $\Delta\rho/\rho$ (■) и упругих модулей $\Delta c_{11}/c_{11}$ (△), $\Delta c_{44}/c_{44}$ (○) пленки Pd_{0.97}Ni_{0.03} при адсорбции газовой смеси 1% H₂ + N₂ (толщина пленки 300 нм, температура 20 °С).

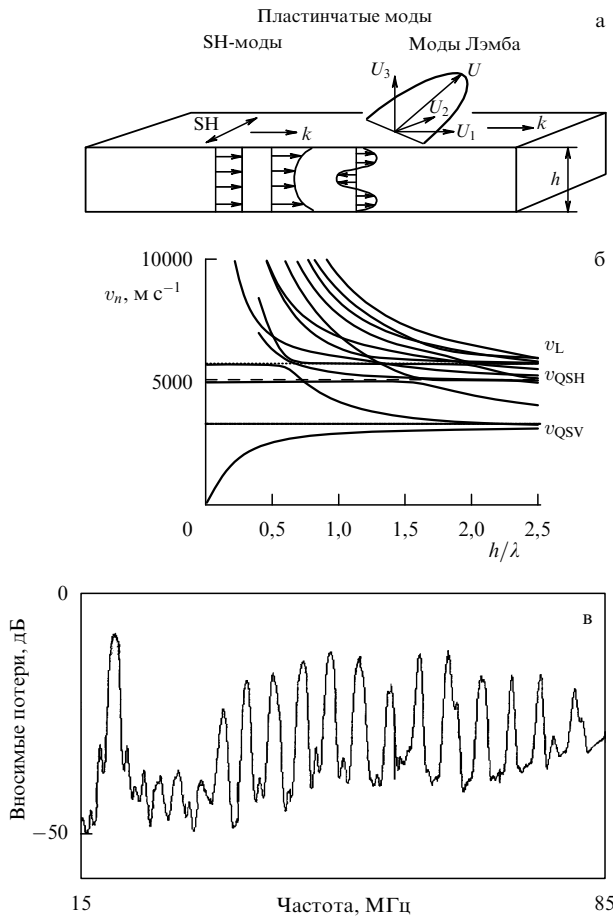


Рис. 3. Основные характеристики нормальных мод в тонких пьезопластинах: (а) типы мод: SH — сдвигово-горизонтальные, U_1 , U_2 , U_3 — эллиптические моды Лэмба; в изотропных пластинах $U_2 = 0$; (б) типичные изменения скорости мод v_n (дисперсия) в зависимости от нормированной толщины пластины h/λ , n — порядок моды, v_L , v_{QSH} , v_{QSV} — скорости объемных волн в том же направлении неограниченного пьезокристалла (ST, α -кварц); (в) амплитудно-частотные характеристики нормальных мод в пластине $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ с $h/\lambda = 2,475$.

откликов на воду и глицерин ($n = 22$ на рис. 4а), удается "почувствовать" менее 2 мкл глицерина в 760 мкл воды, а также проследить кинетику растворения одной жидкости в другой (рис. 4б).

4. Акустический анализатор жидкостей и тепловых процессов

Четвертым примером использования многомодового акустического принципа служит анализатор, показанный на рис. 5а. В нем используются ПАВ и объемные акустические волны (ОАВ), зондирующие стержень 1 с термоизолированными боковыми гранями на разных расстояниях d от рабочей поверхности. На примере испарения капля летучих соединений работа анализатора заключается в следующем [12]. При нанесении капли 2 на рабочую поверхность стержня начинается ее испарение и охлаждение. Внутри стержня образуется температурный профиль $\Delta T(d)$, который измеряется семейством ОАВ (рис. 5б). Из профиля $\Delta T(d)$ определяются: временные изменения температуры капли ΔT , величина градиента температуры на границе капля–

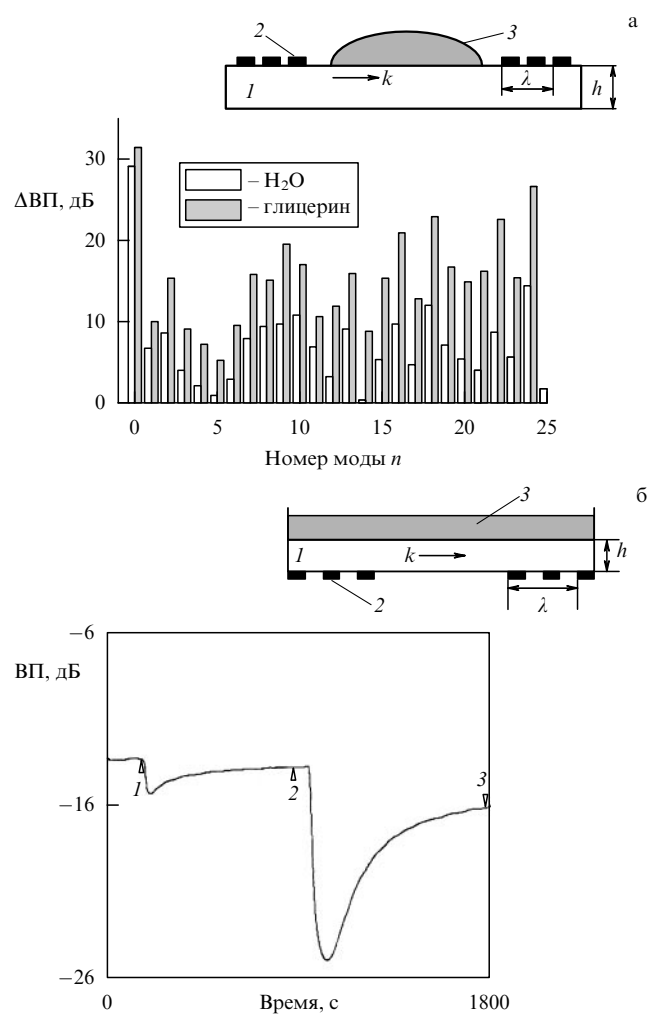


Рис. 4. Многомодовый акустический датчик жидкости (измеритель вязкости): (а) отклики нормальных мод на действие жидкостей с различной сдвиговой вязкостью (пластина $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$, $h/\lambda = 2,475$); (б) кинетика растворения глицерина в воде (мода $n = 22$): метка 1 — введение 2 мкл глицерина в 760 мкл воды (изменение вносимых потерь моды $\Delta\text{ВП}_{12} = 0,5$ дБ), метка 2 — дополнительное введение 10 мкл глицерина ($\Delta\text{ВП}_{13} = 2,9$ дБ). В правой части рисунка — схемы экспериментов: 1 — пьезопластина, 2 — преобразователи для возбуждения и приема нормальных мод, 3 — на рис. а — капля на рабочей поверхности; на рис. б — ванна с жидкостью на противоположной поверхности.

стержень $(\Delta T/\Delta d)_{d=0}$, количество поглощенного тепла $Q = \kappa S \tau (\Delta T/\Delta d)_{d=0}$ и удельная теплота испарения $q = Q/m$ (κ — теплопроводность стержня, τ — время испарения, m — масса капли). Время τ измеряется по исчезновению (при нанесении) и появлению (после испарения) поверхностной волны, растягивающейся через каплю. Скорость испарения определяется как $u_{\text{evap}} = m/t_{\text{evap}}$, кинетика процесса — по временной зависимости акустического отклика $\Delta v/v$ (рис. 5в).

В результате акустический анализатор измеряет сразу четыре характеристики теплового процесса: его кинетику (разрешение 1 с), изменение температуры ΔT (точность $0,01^\circ\text{C}$), выделяемое (поглощаемое) количество тепла Q (порог 0,05 Дж или 30 Дж г^{-1}) и скорость испарения u_{evap} (точность $0,5$ мг с^{-1}). Минимальный объем пробы 0,5 мкл.

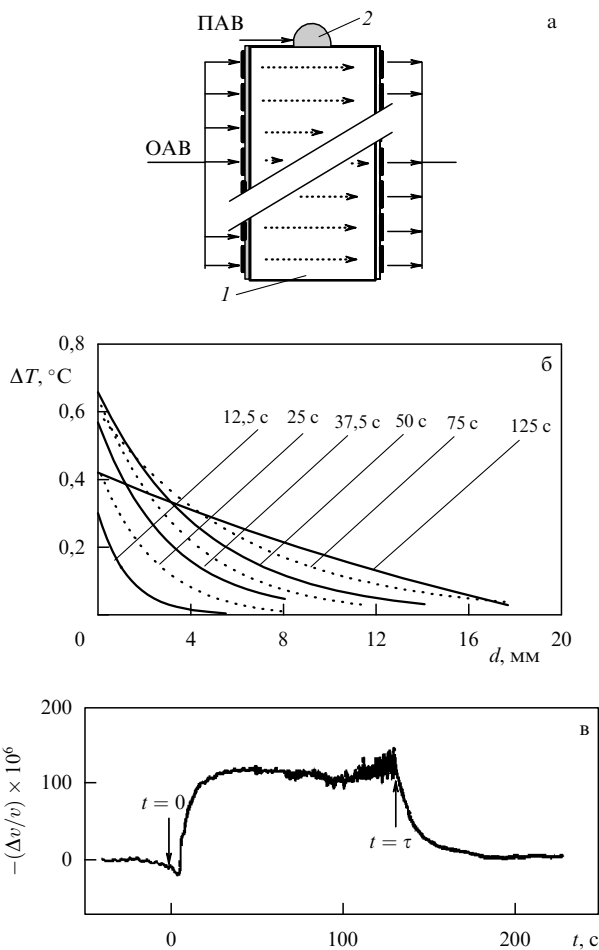


Рис. 5. Акустический анализатор жидкостей и тепловых процессов: (а) принципиальная схема анализатора: 1 — стержень, 2 — микрокапля тестируемой жидкости. (б) Профили охлаждения в процессе (< 60 с) и после (> 60 с) испарения (стержень — плавленный SiO₂, капля — этиловый спирт объемом 5 мкл). (в) Типичный вид кинетики испарения микрокапли: t = 0 — начало испарения, t = τ — окончание испарения (стержень — монокристалл Si, капля — этиловый спирт объемом 8,6 мкл).

5. Система акустических датчиков для контроля замкнутых помещений

Контроль банков, музеев, атомных электростанций и жилых помещений необходим для обеспечения их безопасности. Из-за дыхания, движения и человеческих испарений внутренние условия в помещениях изменяются, и информация об этом поступает на специальные датчики.

На основе многомодового принципа нами разработан лабораторный макет системы контроля, состоящей исключительно из датчиков акустического типа. Эти датчики регистрируют температуру, относительную влажность (rh), скорость воздушного потока и состав внутренней атмосферы по ее теплопроводности. Посредством выбора типа акустической волны каждый датчик делается чувствительным только к одному фиксируемому параметру. Выходные сигналы датчиков регистрируются обычной приемной аппаратурой. Математическая обработка сигналов не требуется.

Для датчика температуры селективность обеспечивается использованием 15-й моды пластины yz-LiNbO₃ толщиной $h/\lambda = 1,67$. Эта мода регистрирует темпера-

турные вариации на уровне 0,001 °C, но не "чувствует" массовой нагрузки поверхности, влажности, газового состава и скорости перемещения окружающего воздуха.

Для датчиков теплопроводности (κ) и скорости воздушного потока (U) использованы рэлеевские ПАВ в yz-LiNbO₃ с малой глубиной локализации (0,7λ) и высокой термочувствительностью (10⁻⁴ °C⁻¹) при T ≈ 100 °C — малая глубина локализации повышает быстродействие датчиков, а высокая термочувствительность позволяет применить термокондуктометрический принцип действия [13] и исключить газочувствительные покрытия. Поддержание датчиков при постоянной высокой температуре (100 °C) делает невозможной адсорбцию водяных паров на подложку и обеспечивает нечувствительность датчиков к влажности и температуре.

Для датчика влажности использована термостабильная ПАВ в звукопроводе из ST,x-кварца с пленкой гироскопического полимера PVA. Для исключения срабатывания датчика на изменения κ и U он поддерживается при постоянной комнатной температуре, при которой термокондуктометрический эффект отсутствует.

Характеристики сенсорной системы представлены в таблице.

Таблица. Характеристики акустической сенсорной системы

Параметр	Диапазон	Разрешение	Стабильность/год
Температура, °C	5–90	±0,05	±3 %
Влажность, %rh	1–50	±0,5	±5 %
	50–90	±1	±10 %
Скорость воздушного потока, мл мин ⁻¹	10–300	±10	±5 %
Теплопроводность, мВт мК ⁻¹	5–45	±0,1	±5 %

6. Выводы

Применение высокочувствительных акустических волн для анализа жидких и газообразных сред — это новое перспективное направление акустоэлектроники, которое принципиально отличается от всех традиционных, основанных на высокостабильных колебаниях и подложках.

Расширение спектра используемых волн привело к ожидаемому увеличению числа измеряемых параметров, круга исследуемых процессов и стабильности сенсорных решеток. Вместе с этим оно породило новые вопросы, от решения которых зависит конкурентоспособность такого подхода: необходимо выяснить, как повысить точность измерений и пространственное разрешение акустоэлектронных сенсоров, если учесть, что их отклики формируются на всем пути распространения волны между излучающим и приемным преобразователями; можно ли получить критерии для более оптимального выбора зондирующих волн в каждом конкретном случае в отдельности, если учесть, что множество кристаллографических ориентаций и направлений распространения в пьезокристаллах неограничено; как снизить нежелательное влияние вибрирующей поверхности звукопровода на свойства исследуемых сред и как расширить круг измеряемых параметров, который сейчас ограничивается массой, упругостью, вязкостью, электропроводностью и температурой. Решению этих вопросов планировалось посвятить наши дальнейшие исследования, но судьба распорядилась иначе ...

Работа выполнена при поддержке Президентского гранта "Научные школы" № НШ-1391.2003.2 и гранта ИНТАС № 01-0257.

Список литературы

1. Nagle H T, Schiffman S S, Gutierrez-Osuna R *IEEE Spectrum* **35** (9) 22 (1998)
2. Gopel W et al. *Sensors Actuators B* **52** 125 (1998)
3. Weimer U, Gopel W *Sensors Actuators B* **52** 143 (1998)
4. Анисимкин В И, Гуляев Ю В, Анисимкин И В *Поверхность* (8) 3 (2000)
5. Анисимкин И В и др. *Акуст. журн.* **48** 12 (2002)
6. Анисимкин И В, Гуляев Ю В, Анисимкин В И *Радиотехника и электроника* **47** 253 (2002)
7. Anisimkin I V, Hickernell F, Verona E, in *Proc. of the 2002 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic* Vol. 1, 453
8. Анисимкин И В *Радиотехника и электроника* **48** 1278 (2003)
9. Анисимкин И В *Акуст. журн.* **50** 149 (2004)
10. Анисимкин И В *Акуст. журн.* **50** 442 (2004)
11. Anisimkin I V *Ultrasonics* **42** 1095 (2004)
12. Anisimkin I V et al., in *Proc. of the 2000 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic* Vol. 1, p. 713
13. Anisimkin V I et al., in *Proc. of the 1995 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic* Vol. 1, p. 481

Уважаемые подписчики журнала «Успехи физических наук»!

Сообщаем Вам, что подписка на общих основаниях на журнал УФН в 2006 г. будет проводиться по ценам каталога агентства «Роспечать-2006» (индекс 71004 — подписка на полугодие, цена 3000 руб.; индекс 71373 — подписка на год, цена 6000 руб.; Объединенного каталога "Пресса России" (индекс 44170 — подписка на полугодие, цена 3000 руб.) во всех отделениях связи, а также в ООО «Центроэкс».

Льготы предоставляются только при подписке в ООО «Центроэкс» следующим категориям подписчиков:

1. Государственным библиотекам, библиотекам вузов, отраслевым научно-исследовательским институтам и институтам Российской академии наук. Специальная цена для указанных организаций на журнал «Успехи физических наук» на первое полугодие 2006 г. составит 1500 руб., а на весь 2006 г. — 3000 руб., включая почтовые расходы.

2. Индивидуальным подписчикам — сотрудникам указанных выше организаций (при предъявлении в ООО «Центроэкс» справки с места работы).

Индивидуальная подписка будет проводиться только в ООО «Центроэкс» по принципу: один специалист — одна подписка (840 руб. на весь 2006 год, включая почтовые расходы). Для льготных категорий подписчиков 2005 г. представление новых справок не требуется.

Организации БАН, БЕН, ИНИОН, ГПНТБ СО РАН, ВИНТИ и др., специализирующиеся на комплектовании научных и вузовских библиотек, могут оформить подписку в ООО «Центроэкс», предварительно согласовав с Кольцовой Ларисой Арсентьевной (тел. 456-8601) список пользующихся их услугами организаций и количество льготных подписок.

Деньги следует перечислять в ООО «Центроэкс»:

ИНН 7714109278 КПП 771401001 на р/счет 40702810538300103299 в Сбербанк РФ г. Москвы Тверское ОСБ № 7982, БИК 044525225, к/с 30101810400000000225.

Заказы направлять по адресу: **125493 РФ, Москва, ул. Смольная 14, ООО «Центроэкс», подписка на журнал «Успехи физических наук».**

Тел./Факс (095) 456-8601, E-mail: centroex@orc.ru

Убедительно просим всех подписчиков журнала «Успехи физических наук» (как учреждения, так и индивидуальных подписчиков), имеющих право на подписку по специальным ценам, направить свои заказы и письма (содержащие бланк заказа, квитанцию об оплате, заявку от учреждения или справку с места работы) в ООО «Центроэкс» до 31 декабря 2005 г. Поздно поданная заявка будет оформляться только с соответствующего месяца.

**Редколлегия и редакция журнала
«Успехи физических наук»**

✂-----

БЛАНК ЗАКАЗА

Просим выслать по подписке _____ экземпляров журнала "Успехи физических наук".

Оплата за (№№, год) _____

в сумме _____ рублей произведена платежным поручением (почтовым переводом) № _____

от "_____" _____ 200__ года на расчетный счет ООО "ЦЕНТРОЭКС" ИНН 7714109278

КПП 771401001 р/с 40702810538300103299 в Сбербанк РФ г. Москвы Тверское ОСБ № 7982, БИК 044525225,

к/с 30101810400000000225. Копия платежного поручения (почтового перевода) прилагается.

Почтовый адрес для доставки журнала _____