

ЭЛЕКТРОННЫЙ ЯЗЫК НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Колешко В.М., Дейнак Д.А., Хмурович Н.В.

Design and experimental results of a surface acoustic wave (SAW) microsensor with polymer microfluidic cell for the sensing and identification of liquids is presented in this article. This microsensor, which is a part of a smart electronic tongue system, uses for the detection and identification of liquids. The design consists of a dual-delay-line configuration in which one line is free and other one is metallized. Synthetic samples were analyzed with the four basic tastes of sour, salt, bitter, and sweet. The electronic tongue classified correctly all of the different basic tastes without a selective biological or chemical coating. Theory relating to the electro-acoustic properties represented by the relative permittivity and conductivity of the sample liquid is presented and related to experimental results.

Биологическая роль вкусовых ощущений заключается не только в проверке съедобности пищи человеком и другими живыми организмами. Вкусовые ощущения влияют на процесс пищеварения, так как рефлекторно связаны с секрецией пищеварительных желез и действуют не только на интенсивность секреции, но и на состав секрета – в зависимости от того, какие вкусовые качества в пище преобладают. В конечном итоге это отражается на самочувствии и здоровье.

Все вкусовые ощущения разделяются на 5 групп: сладкий, соленый, кислый, горький, пряный (мясной). Многие вкусовые раздражители человека вызывают смешанные ощущения. На поверхности языка человека можно выделить области специфической чувствительности. Однако между химическими свойствами веществ и их вкусом не существует никакой определенной корреляции. Например, не только сахар, но и соли свинца имеют сладкий вкус. Более того, воспринимаемое качество вещества зависит от его концентрации – например, поваренная соль в малых концентрациях кажется сладкой.

Поэтому исследование, разработка, производство, как электронных языков, так и электронных носов является актуальной задачей. Это позволит обезопасить рынок и человека от поддельных продуктов питания, в частности, минеральную воду от подделки, а вина и колбасу – без солей свинца. Компьютерная программа составит вкусовой образ тестируемого продукта, а полученный результат сравнивается с эталоном на продукт. Например, в результате анализа обнаруживается, что газированная вода слишком приторна, пиво с кислым привкусом, сок недостаточно свежий, а творог имеет горько-кислый привкус.

Электронный язык – микросенсорная система, вместе с интеллектуальной микропроцессорной обработкой сигнала, способная идентифицировать химические образы вкуса сложных веществ и определить концентрации отдельных компонентов в них.

Одним из наиболее перспективных направлений в разработке интеллектуальных сенсорных систем вкуса является создание электронных языков на поверхностно-акустических волнах (ПАВ) [1].

Электронный язык на ПАВ представляет собой тонкую пластину из пьезоэлектрического материала (например, кварц, $LiNbO_3$, $LiTaO_3$, $Si/SiO_2/ZnO$, $Si/SiO_2/AlN$), на которую нанесены, напылением металла, электроды для двух систем встречно-штыревых преобразователей (ВШП). Электроды связаны с генератором переменного тока с диапазоном частот до 5 ГГц. Напряжение переменного тока индуцирует в пьезоактивной подложке акустическую волну, распространяющуюся со скоростью ~3000 м/с. Длина акустической волны определяется расстоянием между электродами ВШП. Электронные языки на ПАВ структурах могут функционировать в нескольких режимах (резонатора, линии задержки [1,2]), а также использовать дифференциальную схему, состоящую из двух резонаторов, двух линий задержки, одной линии задержки и одного резонатора [3,4]. Дифференциальная схема электронного языка позволяет одновременно измерить два механических (физико-акустических) и два электрических (электроакустических) параметра исследуемых жидких и/или гетерогенных сред.

На рис. 1 представлена сенсорная система электронного языка с двумя линиями задержки. Одна линия задержки (металлизована Au/Cr) измеряет механические параметры (вязкость, массу, импеданс), а вторая – измеряет диэлектрическую проницаемость и электропроводность среды. Электрические параметры связаны с некоторыми свойствами вкуса, так, например, соленое – натрий, сладкое – сахараза.

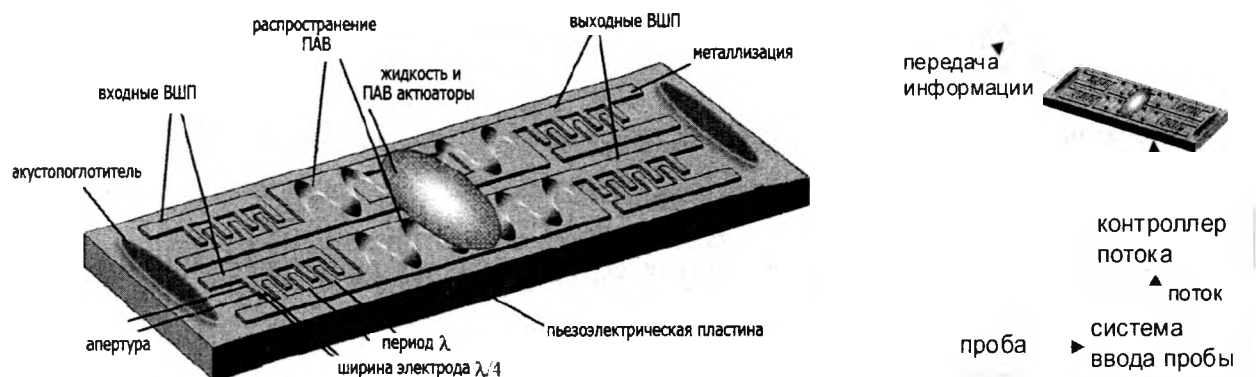


Рис. 1. Структурная схема электронного языка с сенсорной считывающей системой на ПАВ.

При акустоэлектрическом взаимодействии с исследуемой средой изменяется скорость и/или происходит затухание акустической волны (табл. 1, рис. 2) – один из принципов считывания электрических свойств жидких и гетерогенных сред.

Табл. 1. Плотность, скорость звука, характеристический импеданс для некоторых веществ

Вещество	ρ , кг/м ³	c , м/с	Z , кгм ⁻² с ⁻¹
Вода	993	1527	$1,516 \cdot 10^{-6}$
Этиловый спирт	789	1119	$0,883 \cdot 10^{-6}$
Кровь	1060	1530	$1,65 \cdot 10^{-6}$
Воздух при н.у.	1,2	330	$0,0004 \cdot 10^{-6}$
Четыреххлористый углерод	1595	887	$1,415 \cdot 10^{-6}$

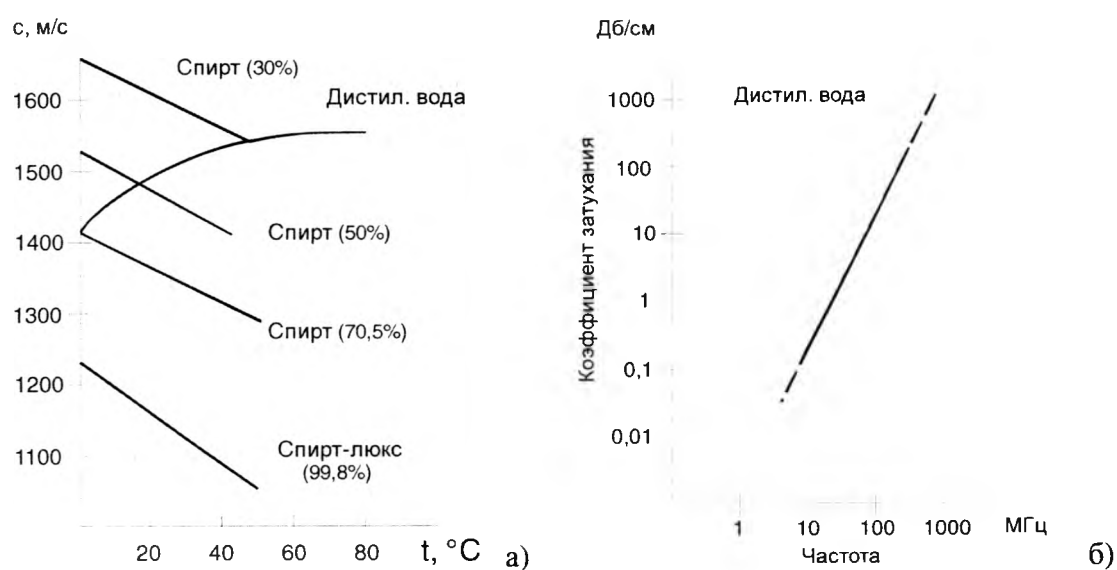


Рис. 2. Зависимость скорости звука от температуры (а) и коэффициента затухания (б) для эталонных сред.

Проводимость излучения ПАВ состоит из активной и реактивной составляющей

$$G_{f\lambda\lambda} = G(\omega) + jB(\omega) \quad (1)$$

Активная акустическая проводимость $G(\omega)$ связана с проводимостью при резонансной частоте G_0 и с угловой частотой ω ПАВ-микросенсора и может быть записана следующим выражением:

$$G(\omega) = G_0 \left[\frac{\sin(\omega)}{\omega} \right]^2, \quad (2)$$

Угловая частота есть функция числа пар электродов ВШП (N) и резонансной частоты ω_0

$$\omega = \pi N \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}. \quad (3)$$

Проводимость при резонансной частоте G_0 есть функция геометрических параметров прибора, а также сопротивления

$$G_0 = 2.25\omega_0 N^2 A (\varepsilon_0 + \varepsilon_s) \frac{K^2}{2}, \quad (4)$$

где A – акустическая апертура, определяющая область эффективного взаимодействия соседних электродов, ε_0 и ε_s – диэлектрическая проницаемость в вакууме и пьезоэлектрической подложки соответственно. Коэффициент электромеханической связи (K) обуславливается кристаллографическим срезом кристалла, резонансной частотой, механическими свойствами и толщиной металлизации ВШП [1].

Реактивную акустическую проводимость $B(\omega)$ можно описать формулой

$$B(\omega) = G_0 \left[\frac{\sin(2\omega) - 2\omega}{2\omega^2} \right]. \quad (5)$$

Ток I определяется статической емкостью ВШП на единицу длины перекрытия электродов C_T и полной акустической проводимостью $G_{f\lambda\lambda}$. Входная полная проводимость передатчика ВШП равна

$$A_{11}(\omega) = \frac{I_1}{V} = G(\omega) - jB(\omega) + j\omega C_T. \quad (6)$$

Вследствие взаимодействия, входная полная проводимость приемника ВШП A_{22} равна входной полной проводимости передатчика A_{11} . Поэтому передаточная функция полной проводимости от передатчика к приемнику должна приближенно вычисляться по формуле

$$A_{12}(\omega) = G(\omega) \alpha \exp(-j2\pi L/\lambda) \quad (7)$$

где время задержки $\tau = \frac{L}{v} = \frac{L}{f\lambda}$, L – расстояние между центрами входного и выходного

ВШП, λ – длина волны, α – коэффициент затухания и v – фазовая скорость.

При добавлении исследуемого вещества в чувствительную область происходят изменения, которые затрагивают передаточную функцию полной проводимости – изменяется время задержки и происходит затухание звуковой волны. Эти изменения должны быть добавлены в передаточную функцию как дополнительный фазовый сдвиг и затухание. С учетом этих изменений уравнение для передаточной функции полной проводимости имеет вид

$$A_{12}(\omega) = G(\omega) \alpha \exp\left(-\frac{j2\pi L}{\lambda}\right) \exp\left(\frac{j2\pi\delta l}{\lambda}\right) \exp(\alpha l) \quad (8)$$

где $\delta = \Delta v/v$ – незначительное изменение скорости вследствие процесса считывания, l – протяженность контактирующей с жидкостью области и α – затухание ПАВ вследствие процесса считывания вдоль l . После возмущения, изменения в скорости и затухании будут приближенными

$$\frac{\Delta v}{v} \approx \frac{K_s^2 \left(\frac{\sigma}{\omega}\right)^2 + (\varepsilon_r \varepsilon_0 - \varepsilon_r \varepsilon_0) (\varepsilon_r \varepsilon_0 + \varepsilon_p^T)}{2 \left(\frac{\sigma}{\omega}\right)^2 + (\varepsilon_r \varepsilon_0 + \varepsilon_p^T)^2}, \quad (9)$$

$$\frac{\Delta \alpha}{k} \approx \frac{K_s^2 \left(\frac{\sigma}{\omega}\right) (\varepsilon_r \varepsilon_0 + \varepsilon_p^T)}{2 \left(\frac{\sigma}{\omega}\right)^2 + (\varepsilon_r \varepsilon_0 + \varepsilon_p^T)^2}, \quad (10)$$

Здесь K_s^2 – коэффициент электромеханической связи, ε_p^T – эффективная диэлектрическая проницаемость кристалла, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость сравнительной жидкости (дистиллированная вода), ε_r и σ – относительная диэлектрическая проницаемость и электропроводность (связаны с потерями при измерении). Изменения в скорости $\Delta v/v$ и в затухании $\Delta \alpha/k$ (где k – волновое число: $k = 2\pi/\lambda$ и λ – длина волны) могут быть определены для различных фаз и соотношений амплитуд с помощью векторного вольтметра. Исключая относительную диэлектрическую проницаемость или электропроводность из (9) и (10) можно получить следующие формулы

$$\left[\frac{\Delta v}{v} + \frac{K_s^2 (2\varepsilon_r \varepsilon_0 - \varepsilon_r \varepsilon_0) + \varepsilon_p^T}{4 \varepsilon_r \varepsilon_0 + \varepsilon_p^T} \right]^2 + \left[\frac{\Delta \alpha}{k} \right]^2 = \left[\frac{K_s^2 \varepsilon_r \varepsilon_0 + \varepsilon_p^T}{4 \varepsilon_r \varepsilon_0 + \varepsilon_p^T} \right]^2 \quad (11)$$

$$\left[\frac{\Delta v}{v} + \frac{K_s^2}{2} \right]^2 + \left[\frac{\Delta \alpha}{k} - \frac{K_s^2 \varepsilon_r \varepsilon_0 + \varepsilon_p^T}{4 \sigma/\omega} \right]^2 = \left[\frac{K_s^2 \varepsilon_r \varepsilon_0 + \varepsilon_p^T}{4 \sigma/\omega} \right]^2 \quad (12)$$

Они используются для построения диаграммы диэлектрическая проницаемость – электропроводность, показанной на рис. 3.

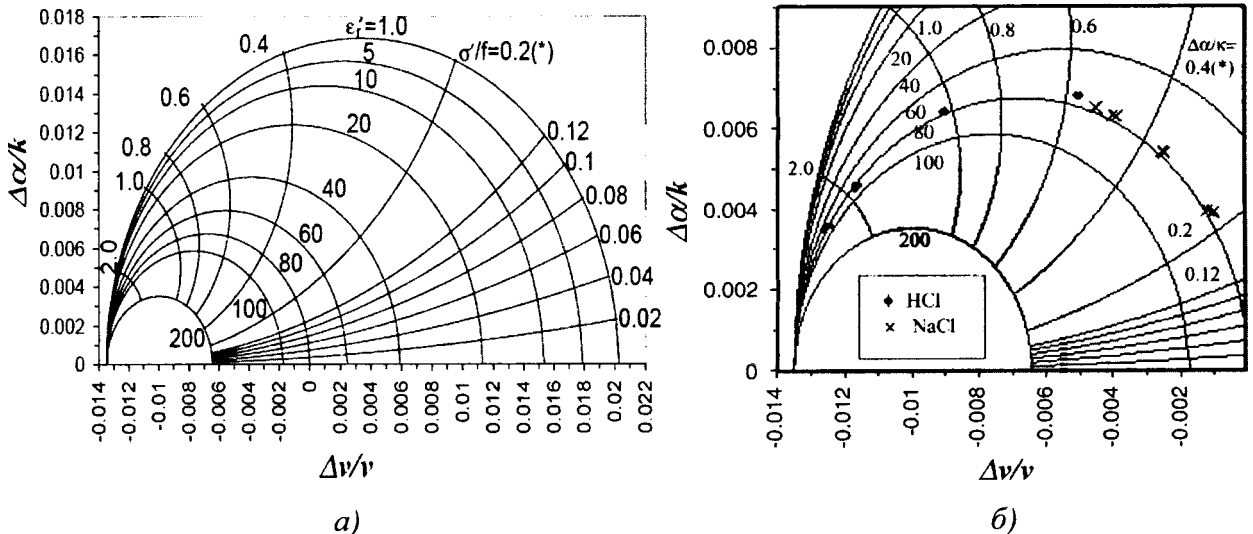


Рис. 3. Диаграмма диэлектрическая проницаемость – электропроводность показывающая теоретическое (а) и экспериментальное (б) поведение исследуемой среды (дистиллированной воды) (*: 1×10^{-8} (С/м)/Гц).

Таким образом, изменения в скорости и затухании ПАВ в двух линиях задержки есть функция диэлектрической проницаемости, электропроводности, вязкости и плотности исследуемой среды.

При разработке сенсоров электронного языка учитывается несколько требований. Чувствительность и время срабатывания улучшаются с уменьшением размеров устройств. Звуковые волны конструктивно интерферируют, когда расстояние между смежными парами электродов ВШП равно половине длины волны, с максимально положительной интерференцией при резонансной частоте. При этой частоте эффективность преобразователя максимальна. Подбирая апертуру и число пар электродов можно, воздействуя на входную линию, снизить вносимые потери. Частота пропускания ПАВ-преобразователя также зависит от числа электродов: увеличение числа электродов уменьшает частоту пропускания. И наоборот, чтобы минимизировать емкостное сопротивление устройства количество электродов должно быть минимальным. Кроме того, для уменьшения потерь при преобразовании число электродов должно быть высоким, а уменьшение дифракционных потерь происходит при широкой апертуре. Принимая во внимание эти различные ограничения, были разработаны устройства на ПАВ, в которых оптимально подобраны параметры входных и выходных преобразователей (табл. 2).

Таблица 2. Параметры ПАВ-микросенсоров для электронного языка

Материал звукопровода	LiTaO ₃	Si/SiO ₂ /ZnO	SiO ₂	Si/SiO ₂ /AlN	GaAs	LiNbO ₃
Ширина электродов ВШП, мкм	17	3	3	3	2	2
Скорость ПАВ, м/с	4212,6	2943,82	3159	3679,93	2604	3488
Частота синхронизма, МГц	55-65	245,32	263,03	306,661	325,5	436
Число пар электродов ВШП	28	9	19	31	67	4
Апертура ВШП, мкм	30λ	89λ	46λ	89λ	4λ	221λ
Длина ПАВ, мкм	7513	12	12	12	8	8

Чтобы контролировать подачу исследуемого вещества, была разработана специальная печатная плата и элемент, который содержит вещество до начала анализа. Этот элемент имеет размеры 32 мм × 20 мм с резервуаром в центре 6,8 мм × 2,5 мм × 8 мм и объемом 136 микролитров. Проба помещается точно по центру между ВШП (рис. 4).



Рис. 4. Лабораторный электронный язык на ПАВ.

Лабораторный электронный язык на ПАВ имеет типичные для ПАВ-сенсорных устройств вносимые потери в 9,652 дБ.

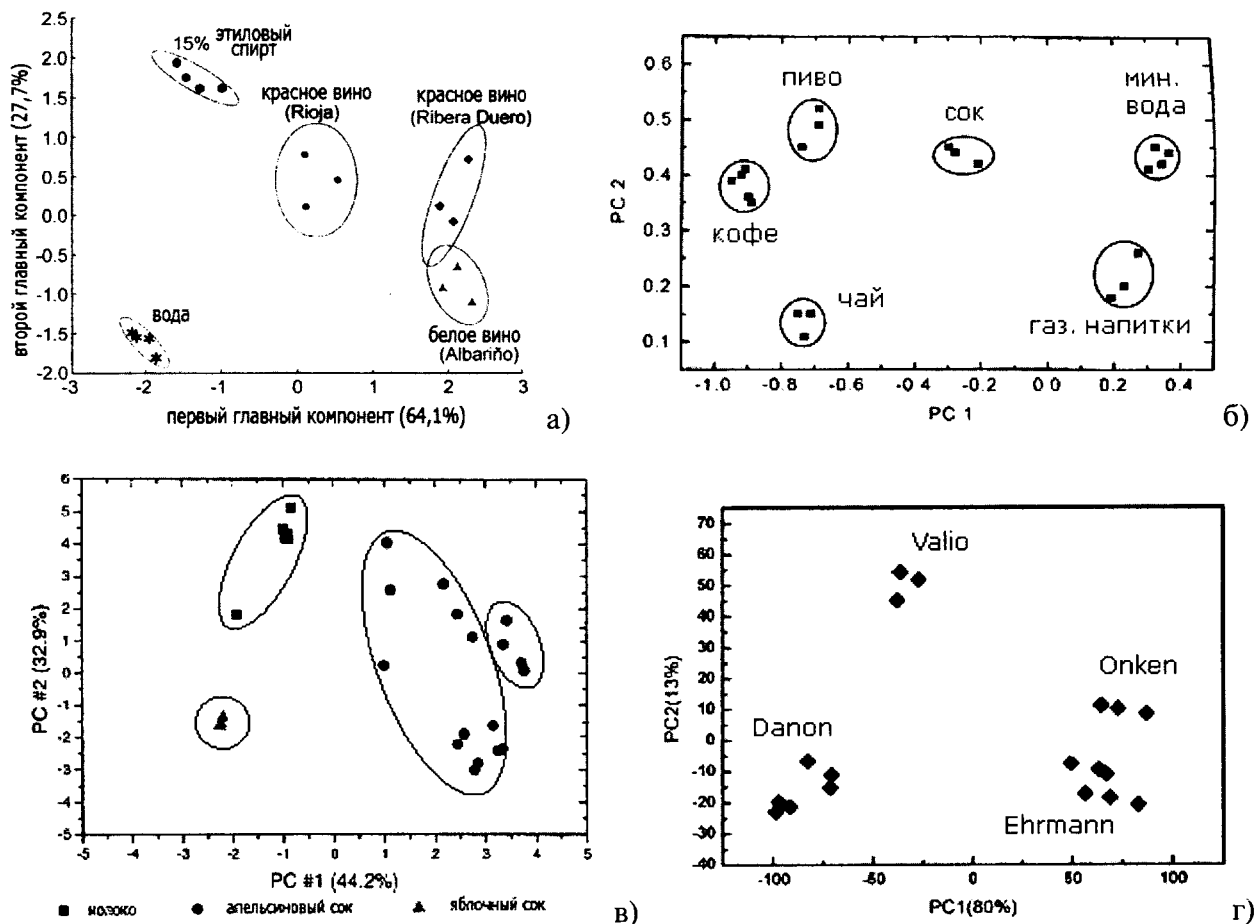


Рис. 5. Вкусовые образы идентифицируемых жидкостей: а) вино, б) прохладительных напитков, в) молоко и соки, г) йогурты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В.М., Мешков Ю.В. Микроэлектронные преобразователи информации на поверхностно-акустических волнах - М.: Электроника, №9, 1985.
2. Колешко В.М., Мешков Ю.В., Скопич В.И., Трынов В.Г. Преобразователь информации на поверхностных акустических волнах. А.с. СССР № 1648234, 1991.
3. Колешко В.М., Мешков Ю.В., Лозовский Э.И. Дифференциальный пьезоэлектрический преобразователь на поверхностных акустических волнах. А.с. СССР № 1501867, 1989.
4. Колешко В.М., Мешков Ю.В., Лозовский Э.И. Стабильные высокочастотные генераторы на быстродействующих логических элементах с резонаторами на поверхностных акустических волнах // Приборы и техника эксперимента. – 1988. №3.-с.119-122.