

03;08

Одноканальный датчик на горизонтально-сдвиговых поверхностных акустических волнах для идентификации веществ в жидкой фазе

© Р.Г. Крышталь, А.В. Медведь

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл.
E-mail: avm@ms.ire.rssi.ru

Поступило в Редакцию 4 июня 2009 г.

Экспериментально показана принципиальная возможность распознавания жидких аналитов в одноканальном датчике — линии задержки на поверхностных акустических волнах горизонтально-сдвиговой поляризации, изготовленной на основе слоистой структуры на подложке из $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$. Откликом датчика служит изменение под действием аналита импульсной характеристики, получаемой путем преобразования одного из измеряемых S -параметров линии задержки из частотной области во временную.

Датчики на основе устройств на поверхностных акустических волнах с горизонтально-сдвиговой поляризацией [1] (ГС-ПАВ) используются для исследования жидких аналитов, в том числе и биологических. Не имея нормальной компоненты механических смещений, ГС-ПАВ слабо затухают при контакте поверхности распространения с жидкой и вязкой средой, что и позволяет использовать волны этого типа для создания жидкостных датчиков. В настоящее время опубликовано большое число работ, посвященных исследованию и применению датчиков такого типа (см., например, [2–5]), в том числе и в системах распознавания жидких веществ — системах типа „электронный язык“ [6]. Системы распознавания веществ, будь то „электронный нос“ или „электронный язык“, строятся на базе так называемой решетки датчиков, состоящей из некоторого числа отдельных датчиков, имеющих различные, но достаточные для измерения отклики на различные компоненты

анализируемых веществ [6,7]. В случае использования датчиков на ГС-ПАВ различие откликов датчиков в решетке достигается либо за счет использования в каналах датчика различных пленочных покрытий на пути распространения ГС-ПАВ [4], либо за счет использования ГС-ПАВ на нескольких частотах [5].

В большинстве датчиков на ГС-ПАВ в качестве пьезоэлектрической подложки используются пластины $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$, а для возбуждения и приема ПАВ — обычные для техники ПАВ встречно-штыревые преобразователи (ВШП). На подложке $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$ ВШП возбуждают как приповерхностные объемные акустические волны с ГС-поляризацией, так и утекающие ГС-ПАВ. Фазовые скорости этих двух мод на свободной поверхности подложки практически равны (отличие на тысячные доли процента), и происходит эффективное преобразование ПАВ в объемные волны. Для ослабления такого преобразования пространство между ВШП обычно покрывается электропроводящей пленкой, которая „поджимает“ ПАВ к поверхности подложки. В некоторых работах (например, [4,5]) для увеличения концентрации энергии волны у поверхности и тем самым увеличения чувствительности датчика на поверхность подложки наносилась пленка диэлектрика, например, SiO_2 , толщиной несколько микрон, которая для ГС-ПАВ обладает волноводными свойствами. Таким образом, используемые для датчиков структуры на подложке $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$ могут содержать участки поверхности с различными электрофизическими и акустическими свойствами (неоднородности). Акустические волны с ГС-поляризацией весьма эффективно отражаются от торцевых граней подложки и различных неоднородностей на поверхности. При работе с сигналами в непрерывном режиме, который используется в подавляющем большинстве экспериментальных работ, это приводит к искажениям амплитудных и фазовых характеристик устройства, и для корректных измерений отклика датчика (обычно это изменения амплитуды и/или фазы) необходимо предпринимать специальные меры, уменьшающие такие искажения [5] либо исключаящие их вовсе при использовании импульсного режима возбуждения ПАВ [8].

В настоящей работе приводятся экспериментальные результаты, демонстрирующие возможность идентификации некоторых жидких аналитов с помощью одного одноканального датчика на ГС-ПАВ в многослойных структурах на подложке из $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$. Считающиеся в других случаях паразитными, отраженные волны в нашем случае

используются при формировании отклика датчика. В отличие от всех известных нам опубликованных экспериментальных работ по исследованию жидкостных датчиков на ПАВ, в нашей работе откликом датчика служит изменение под действием аналита импульсной характеристики датчика, получаемой путем обратного быстрого Фурье-преобразования одного из S -параметров, измеряемого в полосе частот пропускания датчика (линии задержки).

Основой исследуемых структур (рис. 1, *a*) служила линия задержки на подложке прямоугольной формы из $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$ с двумя ВШП, состоящими из 5 и 6 пар электродов с периодом $40\ \mu\text{m}$ и апертурой $1.6\ \text{mm}$. Пространство между ВШП было покрыто металлической пленкой толщиной $200\ \text{nm}$, изготавливаемой из Al с подслоем ванадия фотолитографией в едином цикле с изготовлением ВШП. Расстояние между центрами ВШП равнялось $3.34\ \text{mm}$. Размер топологии структур вместе с контактными площадками составлял $2.9 \times 5.5\ \text{mm}$, длина подложек в направлении распространения ПАВ была $8.3\text{--}8.5\ \text{mm}$. Металлизированная поверхность между ВШП и сами ВШП были покрыты пленкой SiO_2 толщиной $3\ \mu\text{m}$, поверх пленки SiO_2 между ВШП наносилась пленка полимера толщиной $5\ \mu\text{m}$, синтезированного из мономеров бисфенол-А-глицеролатдиакрилата с импринтированием молекулами морфолина (MP), которая использовалась нами ранее для увеличения селективности газовых датчиков на ПАВ [9].

Блок-схема экспериментальной установки изображена на рис. 1, *b*. Исследуемый образец с помощью термопроводящей пасты крепился на рабочую поверхность управляемого компьютером термоэлектрического элемента Пельтье (ТЭЭ), обеспечивающего постоянство заданной температуры образца в диапазоне $10\text{--}65^\circ\text{C}$ с погрешностью не более $\pm 0.005^\circ\text{C}$. Высокочастотные выводы образца подключались к прибору для измерения электрических параметров четырехполюсников. Измерялись амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) образца в режимах „на прохождение“ и „на отражение“ (S_{21} , S_{11} и S_{22} параметры) до воздействия на его поверхность аналита и при воздействии. Используемый прибор для измерения параметров цепей позволял также в реальном масштабе времени измерять S -параметры образцов во временной области, т. е. импульсную характеристику. Импульсные характеристики можно было также получать, выполнив с помощью ПК обратное быстрое Фурье-преобразование измеренных в цифровом виде АЧХ. Жидкие аналиты объемом от 0.05 до $0.1\ \text{ml}$ инжестировались на поверхность

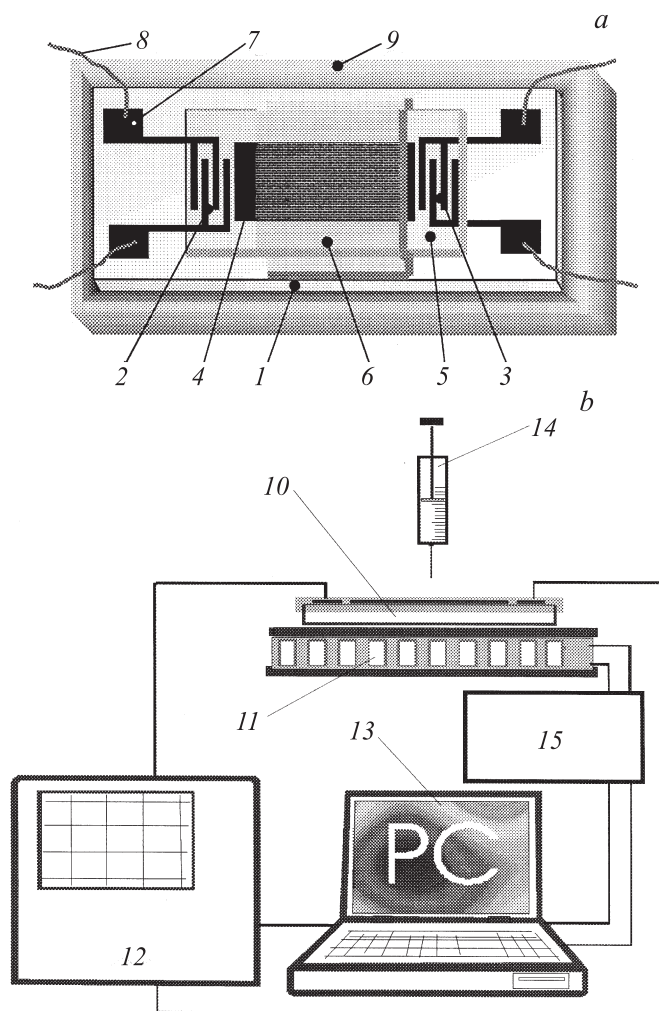


Рис. 1. Конфигурация исследуемых образцов (а). Схема экспериментальной установки (б). 1 — подложка-звукопровод из $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$; 2, 3 — ВШП; 4 — алюминиевая пленка; 5 — пленка SiO_2 ; 6 — пленка молекулярно-импринтированного полимера; 7 — контактные площадки; 8 — золотые проводники; 9 — пластиковый бортик; 10 — исследуемый образец с бортиком; 11 — ТЭЭ; 12 — прибор для измерения S -параметров; 13 — ПК; 14 — шприц для инъекции аналитов; 15 — электронный блок системы термостабилизации.

структуры (датчика) с помощью шприца. Для ограничения растекания аналита структуры имели пластиковые бортики, как показано на рис. 1. Аналит вводился так, чтобы вся поверхность датчика со всеми ее деталями, включая контактные площадки ВШП, была бы полностью покрыта аналитом, при этом, как показали наши эксперименты, отклик датчика не зависел от объема инжесктированного аналита. Измерения АЧХ или импульсной характеристики производились через некоторое время после введения аналита (обычно ≈ 10 s), достаточное для того, чтобы система термостабилизации довела температуру аналита до заданной температуры датчика T_1 . После проведения измерений аналит смывался с поверхности структуры. Затем образец нагревался до 65°C и выдерживался при этой температуре несколько минут, после этого устанавливалась первоначальная температура образца и проводились контрольные измерения S -параметров без введения каких-либо аналитов. Если результаты измерений совпадали с первоначальными, то вводился следующий аналит, если нет — процесс промывки и отжига повторялся.

На рис. 2 приведены результаты измерения параметров S_{11} и S_{22} на центральной частоте 105 МГц в полосе 60 МГц, представленные в виде обратного преобразования Фурье, для одного из образцов $36^\circ\text{YX LiTaO}_3\text{—Al—SiO}_2\text{—MIP}$ до введения и после введения нескольких аналитов. Из рис. 2 видно, что все аналиты оказывают влияние на импульсную характеристику особым образом, что позволяет различить их друг от друга, как это происходит в системах „электронный язык“ и „электронный нос“ с решеткой датчиков, с использованием хорошо известных алгоритмов „анализ главных компонент“ или „нейронных цепей“. В нашем эксперименте аналогом откликов отдельных датчиков могут служить характерные участки импульсной характеристики, скажем, локальные максимумы, соответствующие временам распространения акустических волн от отражающих их элементов до приемного ВШП.

Таким образом, в нашем случае одноканальный датчик способен выполнять роль решетки датчиков, обычно изготовленных с использованием различных чувствительных элементов или даже различных физических принципов. Это вполне объяснимо, так как в исследуемых нами структурах имеются участки поверхности с различными электрофизическими и акустическими свойствами. Различные свойства аналитов (плотность, вязкость, диэлектрическая проницаемость, электропроводность) по-разному влияют на параметры распространения волн по этим

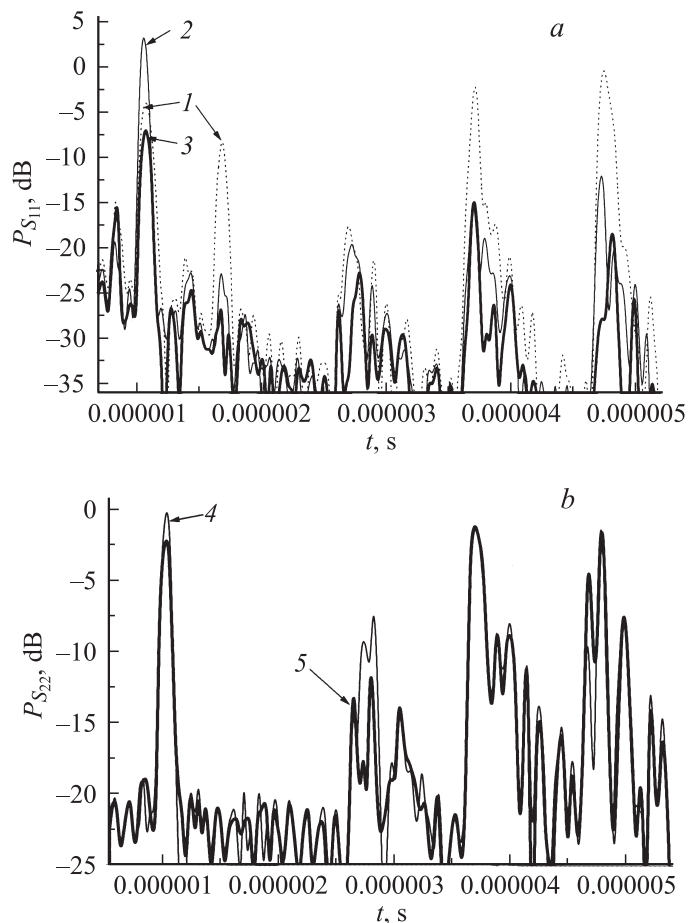


Рис. 2. Обратное Фурье-преобразование амплитуды S_{ii} -параметров, измеренных в частотной полосе 60 МГц на центральной частоте $f_0 = 105$ МГц. Относительная мощность $P_{S_{ii}}$ как функция времени t при воздействии различных анализов при температуре окружающей среды $T_0 = 22^\circ\text{C}$.

a — S_{11} . Кривая 1 — без аналита, 2 — этанол, 3 — однопроцентный раствор морфолина в этаноле; $T_1 = 20^\circ\text{C}$.

b — S_{22} . 4 — водка, 5 — коньяк — жидкости с одинаковым процентным содержанием этилового спирта (40%); $T_1 = 25^\circ\text{C}$.

c — S_{22} . 6 — дистиллированная вода, 7 — кровь; $T_1 = 25^\circ\text{C}$.

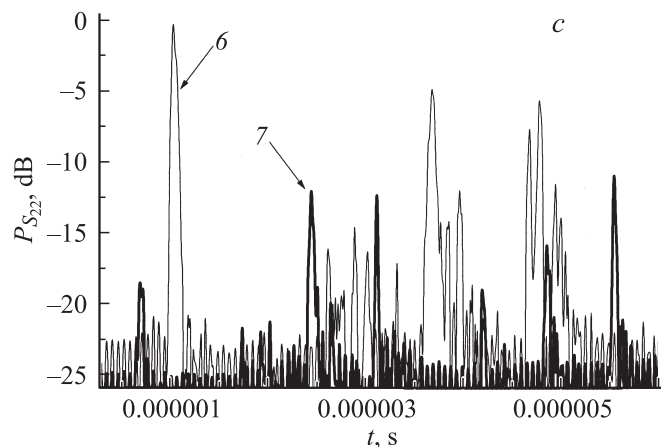


Рис. 2 (продолжение).

участкам. Акустические волны с ГС-поляризацией весьма эффективно отражаются от торцевых граней подложки и различных неоднородностей на поверхности, в том числе и ВШП. Эффективность отражения от различных неоднородностей по-разному зависит от различных свойств анализов, что эквивалентно использованию ряда независимых датчиков. Кроме того, в наших экспериментах акустические волны возбуждаются не на одной частоте, а в сравнительно широкой полосе частот, и, как известно, изменение отклика датчика при изменении частоты в подобных структурах носит нелинейный характер и использование нескольких частот в одной и той же структуре равносильно использованию также нескольких независимых датчиков [5]. Полученные нами экспериментальные результаты действительно демонстрируют способность одноканального датчика работать в качестве „виртуальной“ решетки из нескольких независимых датчиков.

Авторы благодарны Б.И. Западинскому и сотрудникам руководимой им лаборатории за изготовление пленок МИП.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант РФФИ № 07-07-00110.

Список литературы

- [1] *Gulyaev Yu.V.* // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 1998. V. 45. P. 935–938.
- [2] *Kondoh J., Saito K., Shiokawa S., Suzuki H.* // Jap. J. Appl. Phys. 1996. N 1. V. 35. P. 3093.
- [3] *Yamazaki T., Kondoh H., Matsui Y., Shiokawa S.* // Sensors Actuators. 2000. V. A83. P. 34–39.
- [4] *Stefany Jacesko, Jose K. Abraham, Taeksoo Ji* et al. // Smart Mater. Struct. 2005. V. 14. P. 1010–1016.
- [5] *Kondoh J., Okiyama Y., Mikuni S.* et al. // Jap. J. Appl. Phys. 2008. V. 47. N 5. P. 4065–4069.
- [6] *Vlasov Yu., Legin A.* // Fresenius J. Anal. Chem. 1998. V. 361. P. 255–260.
- [7] *Nagle H.T., Schiffman S.S., Gutierrez-Osuna R.* // IEEE Spectrum. 1998. September P. 22–31.
- [8] *Fabrice Martin F., Newton M.I., McHale G.* et al. // Biosensors and Bioelectronics. 2004. N 19. P. 627–632.
- [9] *Роцин А.В., Медведь А.В., Кумпаненко И.В., Западинский Б.И., Тигер Р.П., Крышталь Р.Г., Кундин А.П., Тарасов Д.Н., Гаркуша Е.В., Шашкова В.Т., Певцова Л.А.* // Химическая физика. 2007. Т. 26. № 10. С. 7–17.