

03;08

Гравиметрическая чувствительность акустических волн в тонких пьезоэлектрических пластинах в присутствии жидкости

© И.Е. Кузнецова, Б.Д. Зайцев, С.Г. Джоши, А.С. Кузнецова

Институт радиотехники и электроники РАН, Саратовский филиал,
Саратов, Россия
Marquette University, WI 53201 Milwaukee, PO BOX 1881, USA
Саратовский государственный университет, Саратов, Россия
E-mail: iren@ire.san.ru

Поступило в Редакцию 3 марта 2006 г.

Теоретически проанализировано влияние массовой диэлектрической нагрузки на акустические волны нулевого порядка в пьезоэлектрической пластине танталата лития в присутствии жидкости. Анализ показал, что гравиметрическая чувствительность в общем случае имеет сложную частотную зависимость, а также зависит от толщины пластины и от материала нагрузки. Было показано, что присутствие жидкости может значительно увеличить чувствительность акустических волн нулевого порядка в пьезоэлектрических пластинах к диэлектрической массовой нагрузке.

PACS: 43.35.Ty

Введение. Как известно [1–5], гравиметрическим эффектом называется изменение скорости акустических волн в звукопроводе при нанесении пленки конечной толщины на его поверхность. На основе этого эффекта возможно создание различных биологических и химических датчиков, использующих изменение массы активной пленки в присутствии анализируемого вещества. Одним из важнейших параметров, позволяющих оценивать эффективность подобных устройств, является нормированная гравиметрическая чувствительность S акустических волн к массовой нагрузке [4,5] на поверхности звукопровода $S = (\Delta V/V)/(f\rho_s)$. Здесь $\Delta V/V$ — относительное изменение скорости, ρ_s — масса нагрузки на единицу площади, f — частота волны. При этом анализ влияния

массовой нагрузки на характеристики волн проводится, как правило, в рамках теории возмущения [6].

К настоящему времени известно большое количество работ [1–4], предлагающих использовать различные типы акустических волн, такие как поверхностные акустические волны (ПАВ) Рэлея, поперечно-горизонтальные (SH) ПАВ, псевдоповерхностные волны, изгибные волны в пластинах и т.д. для создания вышеуказанных датчиков. Анализ известных работ указывает на перспективность использования акустических волн в пьезоэлектрических пластинах для создания биологических и химических датчиков. В связи с этим представляет интерес проведение теоретического анализа влияния массовой нагрузки из различных материалов на характеристики антисимметричных (A_0), симметричных (S_0) и поперечно-горизонтальных (SH_0) волн нулевого порядка в пьезоэлектрических пластинах. В работе [5] представлены результаты анализа влияния металлических слоев на характеристики указанных волн в пластине танталата лития ($LiTaO_3$). Показано, что чувствительность этих волн к подобной нагрузке выше, чем у ПАВ и SH ПАВ.

В данной работе теоретически проанализировано влияние диэлектрической массовой нагрузки на A_0 , S_0 и SH_0 волны в пластине $LiTaO_3$ в присутствии жидкости. В качестве массовой нагрузки между жидкостью и пластиной использовались слои кварца (SiO_2) и йодата калия (KI).

2. Исходные уравнения, граничные условия и метод решения. Для анализа влияния массовой нагрузки на характеристики A_0 , S_0 и SH_0 волн решалась стандартная граничная задача [7]. Записывались уравнение движения среды, уравнение Лапласа и материальные уравнения для механического напряжения и электрической индукции с учетом/без учета пьезоэффекта для пьезоэлектрической подложки/диэлектрической нагрузки и жидкости соответственно. Для вакуума учитывалось лишь уравнение Лапласа. Использовались также стандартные граничные условия [7]: 1) механические напряжения на свободных границах равны нулю; 2) компоненты механического смещения и механического напряжения непрерывны на границе между упругими слоями; 3) электрический потенциал и нормальная компонента электрической индукции непрерывны на границе раздела диэлектрических сред. Использовался стандартный матричный метод [7], основанный на представлении искомого решения как суммы парциальных волн.

2.1. Гравиметрическая чувствительность A_0 , S_0 и SH_0 волн к диэлектрической нагрузке. В результате проведенного теоретиче-

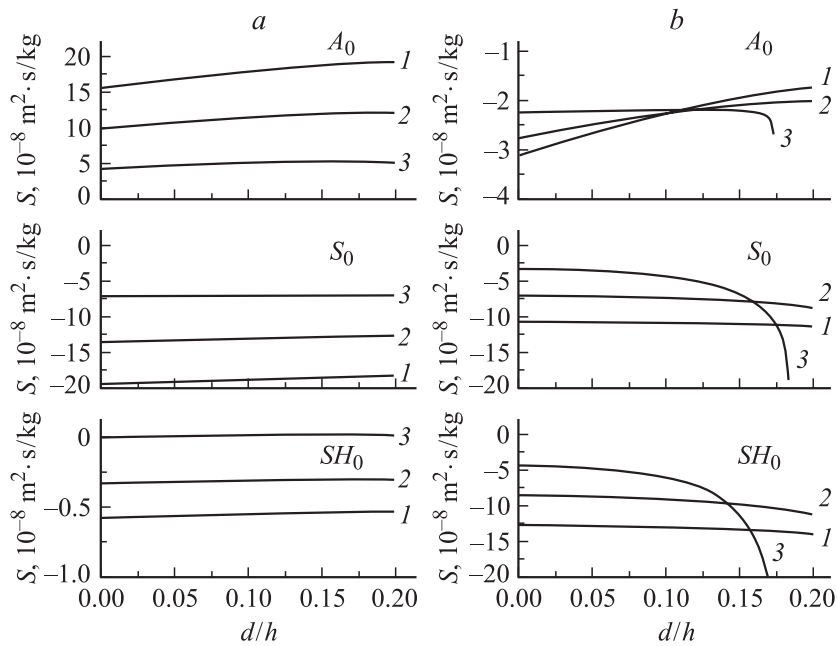


Рис. 1. Зависимость гравиметрической чувствительности S от нормированной толщины массовой нагрузки d/h для A_0 , S_0 и SH_0 волн в структурах „вакуум–пластина $\text{LiTaO}_3\text{–SiO}_2\text{–вакуум}$ “ (а) и „вакуум–пластина $\text{LiTaO}_3\text{–KI–вакуум}$ “ (b) при $hf = 500$ м/с (1), 750 м/с (2) и 1500 м/с (3).

ского анализа были рассчитаны скорости A_0 , S_0 и SH_0 волн в тонкой, по сравнению с длиной волны, пластине LiTaO_3 в присутствии массовой нагрузки из SiO_2 и KI . На рис. 1 приведены зависимости нормированной чувствительности S от нормированной толщины d/h слоя SiO_2 и KI для указанных типов волн при различных значениях параметра hf . Здесь d — толщина слоя нагрузки, h — толщина пьезоэлектрической пластины. Выбор материалов для массовой нагрузки был обусловлен различием в их плотностях, диэлектрических проницаемостях и константах упругости, а ориентация подложки определялась из условия максимальной пьезоактивности рассматриваемой волны [8]: для A_0 волны ($128^\circ Y - X$); для S_0 ($X - Y + 25^\circ$) и для SH_0 волны ($Y - X$). Материальные константы для LiTaO_3 , SiO_2 и KI были взяты из [9,10].

В качестве невозмущенного значения скорости использовалось ее значение для электрически свободной пластины. Из рис. 1 видно, что в большинстве случаев массовая нагрузка приводит к уменьшению скорости акустических волн в пластинах, хотя существуют и противоположные ситуации. Например, скорость A_0 волны в структуре „вакуум-слой SiO_2 –пластина LiTaO_3 -вакуум“ с ростом толщины слоя увеличивается для всех значений параметра hf (рис. 1, *a*). Показано также, что существуют такие значения параметра hf , при которых гравиметрическая чувствительность на зависит от толщины слоя SiO_2 для всех рассматриваемых волн. Обнаружено, что для всех типов волн чувствительность S увеличивается при уменьшении диэлектрической проницаемости слоев. Анализ полученных результатов показывает, что акустические волны в пластинах обладают большей гравиметрической чувствительностью, чем ПАВ и SH ПАВ в одном и том же материале.

2.2. Гравиметрическая чувствительность A_0 , S_0 и SH_0 волн к диэлектрической нагрузке в присутствии жидкости. Влияние диэлектрической пьезоэлектрической массовой нагрузки на характеристики A_0 , S_0 и SH_0 волн в пластине LiTaO_3 при контакте с жидкостью интересно с практической точки зрения. Для решения задачи использовался метод, описанный в п.2 данной статьи. В качестве массовой нагрузки использовались слои SiO_2 и KI, а в качестве жидкости — дистиллированная вода.

В результате проведенного теоретического анализа были рассчитаны скорости A_0 , S_0 и SH_0 волн в структуре „жидкость–диэлектрический пьезоэлектрический слой–пластина LiTaO_3 –вакуум“. В качестве невозмущенного значения скорости использовалось значение, соответствующее структуре „жидкость–пластина–вакуум“. На рис. 2 показаны зависимости нормированной чувствительности S от нормированной толщины d/h слоев SiO_2 и KI для различных значений параметра hf . Сравнение рис. 1 и 2 показывает, что для слоя SiO_2 присутствие воды приводит к значительному увеличению чувствительности для всех рассматриваемых волн. Например, для SH_0 волны при $hf = 500$ м/с чувствительность возрастает примерно в 40 раз. Как известно [4], эта волна распространяется в присутствии жидкости без значительного затухания. Таким образом, полученные результаты показывают возможность использования SH_0 волн для создания высокочувствительных биологических и химических датчиков, работающих в контакте с жидкостью. В случае слоя KI присутствие жидкости приводит к некоторому уменьшению чувствительности. Это можно объяснить тем, что у слоев

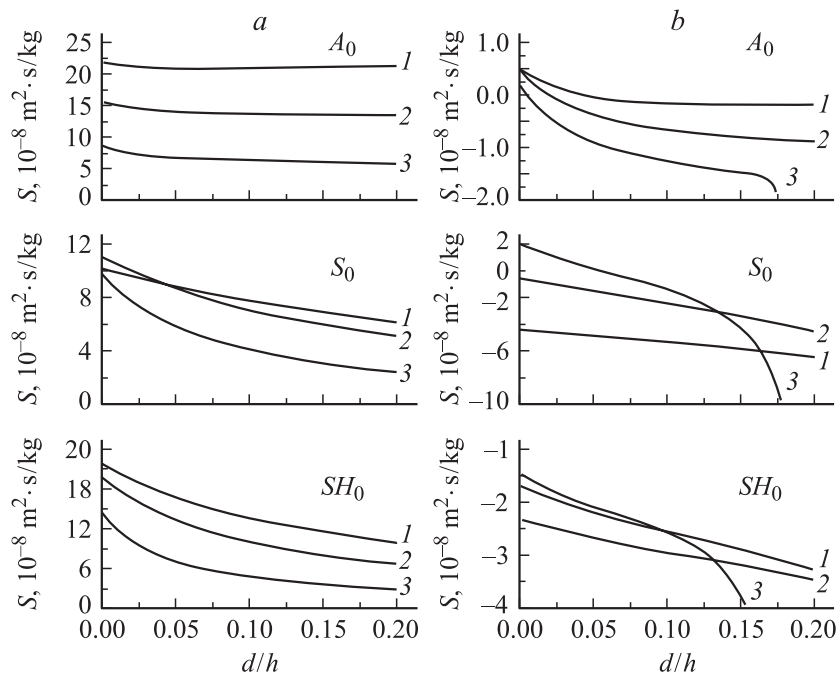


Рис. 2. Зависимость гравиметрической чувствительности S от нормированной толщины массовой нагрузки d/h для A_0 , S_0 и SH_0 волн в структурах „дистиллированная вода–слой SiO_2 –пластина LiTaO_3 –вакуум“ (a) и „дистиллированная вода–слой KI–пластина LiTaO_3 –вакуум“ (b) при $hf = 500 \text{ m/s}$ (1), 750 m/s (2) и 1500 m/s (3).

SiO_2 и KI существенно различаются значения плотности и констант упругости.

Таким образом, в работе было показано, что A_0 , S_0 и SH_0 волны обладают большей гравиметрической чувствительностью, чем ПАВ и SH ПАВ в одном и том же материале. Обнаружено, что для всех типов исследованных волн чувствительность увеличивается при уменьшении диэлектрической проницаемости слоев. Продемонстрирована возможность разработки на основе этих волн высокочувствительных биологических и химических датчиков, которые могут работать не только на воздухе, но и в жидкости.

Работа поддержана грантом NSF #ECS-0401350 (США), грантом РФФИ № 05-02-16947, Фондом содействия отечественной науке, грантом программы „Поддержка развития Высшей школы 2006–2008 гг.“ (РНП.2.1.1.8014), и ФЦНТП „Поддержка исследований молодых докторов наук“ (очередь IV).

Список литературы

- [1] *Wenzel S.W., White R.M.* // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. N 20. P. 1976–1978.
- [2] *Baer R.L., Flory C.A., Tom-Moy M.* et al. // Proc. IEEE Ultrasonics Symp. 1992. V. 1. P. 293–298.
- [3] *Josse F., Andle J., Vetelino J.* // IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelectr. and Freq. Control. 1995. V. 42. N 4. P. 517–524.
- [4] *Ballantine D.S., White R.M., Martin S.J., Ricco A.J., Frye G.C., Zellers E.T., Wohltjen H.* Acoustic Wave Sensors: Theory, Design, and Physico-Chemical Applications. San Diego: Academic Press, 1997. 455 p.
- [5] *Джоши С.Г., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е.* и др. // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 6. С. 707–711.
- [6] *Auld B.A.* Acoustic Fields and Waves in Solids. V. 2. New York: Wiley, 1973. 328 p.
- [7] *Поверхностные акустические волны* / Под ред. А. Олинера. М.: Мир, 1981. Гл. 2.
- [8] *Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Joshi S.G.* et al. // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr. 2001. V. 48. N 1. P. 322–328.
- [9] *Kovacs G., Anhorn M., Engan H.E.* et al. // Proc. IEEE Ultrasonics Symp. 1990. V. 1. P. 435–438.
- [10] *Slobodnik A.J., Conway E.D., Delmonico R.T.* Microwave Acoustics Handbook. Bedford, AFCRL-TR-73-0597. 1973. 725 p.