

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 541.183.5+548.571

### АНАЛИЗ РАДИАЦИОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ЛЭМБА В ПЛАСТИНАХ, НАГРУЖЕННЫХ НЕВЯЗКОЙ НЕПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ<sup>1</sup>

© 2023 г. Н. А. Агейкин<sup>а</sup>, \*, В. И. Анисимкин<sup>а</sup>, Н. В. Воронова<sup>б</sup>, А. В. Смирнов<sup>а</sup><sup>а</sup> *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
ул. Моховая, 11, корп. 7, Москва, 125009 Российская Федерация*<sup>б</sup> *Научно-исследовательский институт молекулярной электроники,  
ул. Академика Валеева, 6/1, Москва, Зеленоград, 124460 Российская Федерация*

\*E-mail: ageykin\_niki@mail.ru

Поступила в редакцию 17.05.2023 г.

После доработки 17.05.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Экспериментально исследована зависимость радиационных потерь в жидкость от величины, нормальной к пластине компоненты смещения  $U_3$  на поверхности пьезоэлектрической пластины для волн Лэмба различных порядков. Рассмотрены волны, у которых фазовая скорость  $V_n$  в пластине больше, чем скорость продольной объемной акустической волны в жидкости  $V_ж$ . Показано, что при малых значениях  $U_3$  излучение в жидкость отсутствует и величина радиационных потерь близка к нулю даже при  $V_n > V_ж$ , при больших значениях  $U_3$  величина радиационных потерь велика и у волн Лэмба в пластине YZ-LiNbO<sub>3</sub> при нормированной на длину волны толщине 1.75 и частоте 16.97 МГц она достигает значения 4 дБ/мм, сравнимого с радиационными потерями поверхностных акустических волн в том же материале.

DOI: 10.31857/S0033849423100029, EDN: DOAZHJ

#### ВВЕДЕНИЕ

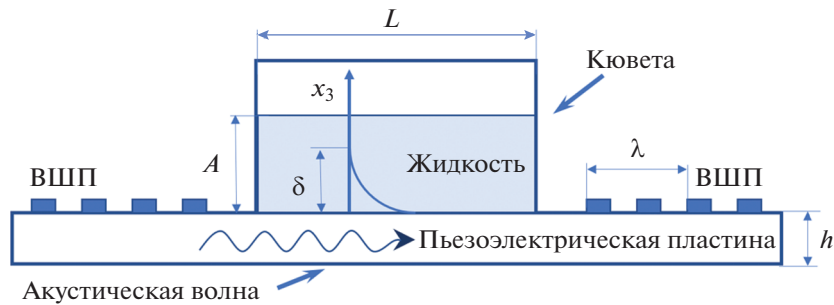
Потребность в миниатюрных высокочувствительных датчиках свойств жидкости стимулирует их разработку с использованием различных физических принципов. Одним из таких принципов, является акустоэлектронный метод [1]. В датчиках акустоэлектронного типа измерение каждого параметра жидкости (плотности, вязкости, проводимости, температуры и т.д.) производится с помощью специально подобранной акустической волны. Подобная волна, с одной стороны, должна иметь возможность распространяться в присутствии жидкости, а с другой стороны, обладать высокой чувствительностью к конкретному свойству исследуемой жидкости. Этим требованиям в полной мере отвечают акустические волны Лэмба различных порядков  $n$ , распространяющиеся в пьезоэлектрических пластинах толщиной  $h$  [2]. С увеличением параметра  $h/\lambda$  ( $\lambda$  – длина волны) количество волн Лэмба различных порядков увеличивается, а их фазовая скорость становится тем выше, чем выше порядок волны [2, 3]. Данные волны обладают значительным разнообразием свойств и

по-разному реагируют на одно и то же внешнее воздействие [4, 5].

Процесс оптимизации акустических колебаний в акустоэлектронных датчиках жидкости предусматривает также оценку величины поглощения, которое испытывает акустическая волна под действием тестируемой жидкости. Это поглощение обусловлено вязкоупругими потерями, акустоэлектронным взаимодействием и излучением (радиацией) волн в жидкость, которое возникает при высокой скорости распространения волны в пластине по сравнению со скоростью продольной объемной акустической волны в жидкости ( $V_n > V_ж$ ) [6–8].

Долгое время считалось, что высокоскоростные волны Лэмба, имеющие большие значения  $V_n$  ( $n$  – номер акустической моды) и нормальной компоненты смещения, перпендикулярной плоскости пластины  $U_3$ , должны поглощаться жидкостью полностью, как это происходит с поверхностными акустическими волнами (ПАВ) [2]. Однако в работе [9] было показано, что такие волны все же существуют, а их аналогия с ПАВ не совсем корректна. Это связано с тем, что механические смещения, сопровождающие волны Лэмба, распределены по всей толщине пластины в несколько со-

<sup>1</sup> Работа удостоена премии на 19-м конкурсе молодых ученых имени Ивана Анисимкина.



**Рис. 1.** Схематическое изображение экспериментального образца, содержащего пьезоэлектрическую пластину, встречно-штыревые преобразователи (ВШП), кювету для тестируемой жидкости:  $L$  – длина кюветы,  $\delta$  – глубина проникновения волны в жидкость,  $A$  – высота жидкостного слоя,  $\lambda$  – длина волны, равная периоду ВШП.

тен микрон, а в случае ПАВ эти смещения сконцентрированы в тонком приповерхностном слое подложки толщиной порядка нескольких микрон.

Зависимость радиационных потерь от соотношения скоростей акустических волн в пластине  $V_n$  и жидкости  $V_{ж}$  подробно изучена в работе [8]. На примере антисимметричной волны Лэмба нулевого порядка показано, что при  $V_n < V_{ж}$  затухание волны, связанное с излучением в жидкость, отсутствует, при  $V_n = V_{ж}$  оно возникает и при  $V_n > V_{ж}$  вначале растет, а затем монотонно снижается. При этом влияние поляризации волны на величину радиационного поглощения не рассматривалось.

Недавно появились работы, в которых обнаружены и исследованы акустические волны в пьезоэлектрических пластинах с практически нулевой компонентной  $U_3$  [10, 11], либо волны с эллиптической поляризацией, причем эллипс лежит в плоскости пластины [12–14]. Очевидно, что данные волны могут эффективно использоваться для создания датчиков жидкости. Однако подробного исследования зависимости радиационных потерь этих волн от их поляризации и скорости не проводилось.

Цель данной работы – исследовать зависимость радиационных потерь из-за присутствия невязкой и непроводящей жидкости для волн Лэмба нулевого и высших порядков от их поляризации и фазовой скорости.

## 1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

Для проведения экспериментальных исследований влияния жидкости на радиационные потери волн Лэмба нулевого и высших порядков были использованы линии задержки на основе промышленно выпускаемых пластин:

–  $\text{LiTaO}_3$  поворотного  $64^\circ\text{Y}$ -среза (углы Эйлера  $0^\circ, -26^\circ, 0^\circ$ ), поворотного  $36^\circ\text{Y}$ -среза ( $0^\circ, -54^\circ, 0^\circ$ ) и  $\text{YZ}$ -среза ( $0^\circ, 90^\circ, 90^\circ$ ),

–  $\text{LiNbO}_3$  поворотного  $128^\circ\text{Y}$ -среза ( $0^\circ, 37.86^\circ, \Theta = 30^\circ$  и  $90^\circ$ ),

–  $\text{YZ-LiNbO}_3$  ( $0^\circ, 90^\circ, \Theta = 90^\circ$  и  $120^\circ$ ),

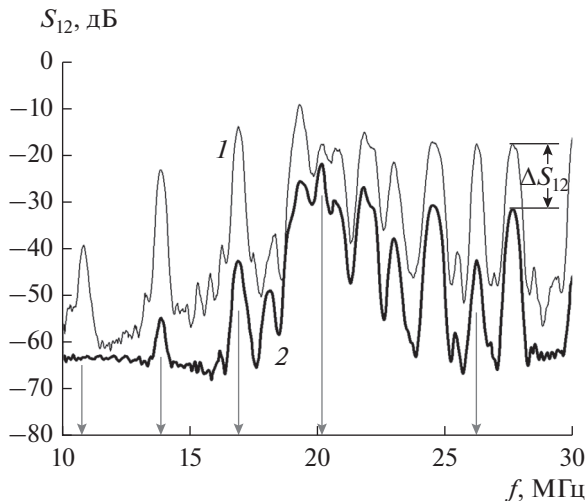
–  $\text{ST}$ -кварца ( $0^\circ, 132.75^\circ, 0^\circ$ ).

Толщина использованных пластин  $h$  составляла 350 или 500 мкм. Все пластины имели одну шлифованную (верхняя) и одну полированную (нижняя) поверхности. На полированной поверхности (оптический класс 14, горизонтальные и вертикальные неровности 0.01 и 0.05 мкм соответственно) были расположены входной и выходной встречно-штыревые преобразователи (ВШП), период которых составлял  $\lambda = 200, 300$  или  $400$  мкм. Преобразователи имели по 40 пар электродов из  $\text{Cr}$  (100 нм) и  $\text{Al}$  (1200 нм), что обеспечивало их узкую полосу пропускания (2.5%) и хорошее частотное разрешение соседних акустических мод с близкими скоростями  $V_n$ .

На шлифованной поверхности (оптический класс 10, горизонтальные и вертикальные неровности 0.16 и 0.8 мкм соответственно) располагалась жидкостная кювета из тефлона с объемом 500 мкл, ширина которой превышала апертуру акустического пучка, что снижало влияние ее стенок и склейки на распространение акустического пучка. В качестве склейки для кюветы использовали салол. Длина кюветы соответствовала длине пробега волны от начала одного до начала другого преобразователя и составляла  $L = 8, 11$  и  $14$  мм при  $\lambda = 200, 300$  и  $400$  мкм соответственно (рис. 1).

В качестве тестируемой жидкости использовали дистиллированную воду, которая благодаря своей малой вязкости (1.003 сПуаз), малой электропроводности (менее 0.1 Сим/м) и большой диэлектрической проницаемости ( $\epsilon/\epsilon_0 = 79.3$ ) минимизировала нежелательные вклады в измеряемые потери от вязкоупругого и акустоэлектронного механизмов поглощения, позволяя исследовать радиационную составляющую в чистом виде.

Эксперименты проводили с помощью анализатора четырехполосников KEYSIGHT 5061B, который работал в амплитудно-частотном режиме и измерял частотные зависимости вносимых потерь  $S_{21}(f)$  мод разных порядков  $n$  на соответствующих



**Рис. 2.** Измеренные амплитудно-частотные характеристики волн Лэмба различных порядков, распространяющихся в пластине  $36^\circ\text{YX-LiTaO}_3$  толщиной  $h/\lambda = 1.67$ : 1 – пластина без жидкости, 2 – пластина с дистиллированной водой между преобразователями; толстыми стрелками указаны моды с большими радиационными потерями, тонкими – моды с малыми радиационными потерями.

частотах  $f_n = V_n/\lambda$ . Измерения  $S_{21}(f)$  проводили при комнатной температуре и нормальном давлении. Вначале зависимость  $S_{21}(f)$  измеряли без жидкостной нагрузки (на воздухе), а затем с дистиллированной водой. Откликом мод на излучение в дистиллированную воду служили величины разности  $\Delta S_{21} = S_{21}(\text{H}_2\text{O}) - S_{21}(\text{воздух})$ . Точность измерений составляла  $\pm 0.1$  дБ.

Измеренные отклики  $\Delta S_{21} = S_{21}(\text{H}_2\text{O}) - S_{21}(\text{воздух})$  сопоставляли с тремя упругими смещениями соответствующих мод  $\{U_1, U_2, U_3\}$  на поверхности пластины, которые численно рассчитывали с использованием программы [15] и материальных констант кварца,  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiTaO}_3$  из работы [16]. Как обычно, сдвигово-горизонтальное  $U_2$  в плоскости пластины и нормальное к плоскости пластины  $U_3$  смещения мод нормировались на величину продольной компоненты  $U_1$  на поверхности пластины. Идентификацию мод осуществляли по совпадению расчетного  $V_n^{\text{th}}$  и экспериментального  $V_n$  значений скоростей.

## 2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведения экспериментальных исследований были получены амплитудно-частотные характеристики для различных срезов и направлений распространения акустических волн Лэмба в пластинах танталата и ниобата лития и кварца. В качестве примера на рис. 2 представле-

ны типичные амплитудно-частотные характеристики волн Лэмба высших порядков, распространяющихся в пластине  $36^\circ\text{YX-LiTaO}_3$  без жидкости (на воздухе) и с жидкостной нагрузкой. Разным пикам соответствуют моды разных порядков  $n$ . Видно, что с ростом частоты мод  $f_n$  или их скорости  $V_n$  монотонного снижения или увеличения радиационных потерь  $\Delta S_{12}$  не наблюдается, т.е. при  $f_n = 10.83, 13.84, 16.88, 20.5$  и  $26.21$  МГц величины  $\Delta S_{12} = 24, 33, 29, 3$  и  $25$  дБ соответственно. Немонотонный характер зависимости  $\Delta S_{12}$  от  $V_n$  мы связываем с влиянием нормальной компоненты смещения  $U_3$ , которая у всех мод различна и составляет 1.5, 1.8, 9, 0.17 и 0.91 соответственно. Таким образом, можно сделать вывод о корреляции величины радиационных потерь  $\Delta S_{12}$  и нормальных смещений  $U_3$ .

Для подтверждения этого вывода в табл. 1 приведены численные значения наибольших радиационных потерь  $\Delta S_{12}$ , измеренные в каждой из пластин. Видно, что:

- все моды с большими потерями  $\Delta S_{12}$  обладают большими значениями нормальных компонент  $U_3$  на поверхности пластины,

- максимальная величина  $\Delta S_{12}$  достигает 32 дБ или 4 дБ/мм для  $\text{YZ-LiNbO}_3$  ( $h/\lambda = 1.75, f_n = 16.97$  МГц), что сравнимо с радиационными потерями поверхностных акустических волн,

- большими радиационными потерями  $\Delta S_{12}$  обладают как моды с высокими частотами  $f_n = 30 \dots 55$  МГц и большими отношениями  $V_n/V_{\text{ж}} = 4 \dots 7$ , так и моды с низкими частотами  $f_n = 10 \dots 15$  МГц и малыми отношениями  $V_n/V_{\text{ж}} = 2 \dots 3$ .

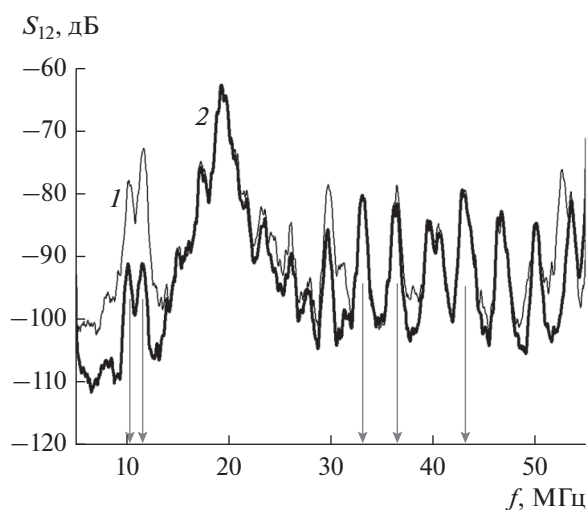
В связи с этим можно сделать вывод о том, что радиационные потери при распространении акустической волны в контакте с жидкостью зависят не только от соотношения  $V_n/V_{\text{ж}}$ , но и от величины нормальной компоненты смещения  $U_3$  на границе пластины с жидкостью, т.е. чем больше  $U_3$ , тем, вообще говоря, выше радиационные потери  $\Delta S_{12}$  при том же значении  $V_n/V_{\text{ж}}$ , и наоборот.

Дополнительным аргументом в пользу роли  $U_3$  служат зависимости и данные, приведенные на рис. 3 и в табл. 1. На рис. 3 приведены амплитудно-частотные характеристики волн Лэмба в пластине  $\text{ST, X-SiO}_2$  при  $h/\lambda = 1.67$ . Видно, что в данной пластине существуют моды с большими  $\Delta S_{12}$  и  $U_3$  ( $f_n = 10.38$  и  $11.66$  МГц) и моды с пренебрежимо малыми  $\Delta S_{12}$  и  $U_3$  ( $f_n = 33.06, 36.22, 42.91$  МГц). Анализ показал, что при малых  $U_3$  излучение в жидкость отсутствует и величина радиационных потерь близка к нулю даже при  $V_n > V_{\text{ж}}$ , а при больших  $U_3$  – она велика и достигает значений 1.7 дБ/мм. По нашему мнению, столь низкие радиационные потери для трех последних мод на-

**Таблица 1.** Акустические моды с большими и малыми радиационными потерями

| Материал  | $h/\lambda$ | $f_n$ , МГц | $V_n^T$ , м/с | $V_n/V_{ж}$ | $\Delta S_{12}$ , дБ<br>( $\Delta S_{12}/L$ , дБ/мм) | $\{U_1^T, U_2^T, U_3^T\}$ |
|---|-------------|-------------|---------------|-------------|--|---------------------------|
| Акустические моды с большими радиационными потерями |             |             |               |             |  |                           |
| 36°YX-LiTaO <sub>3</sub>                            | 1.67        | 10.83       | 3250          | 2.17        | 24 (2.2)   | 1; 0.07; <b>1.5</b>       |
|   |             | 13.84       | 4150          | 2.77        | <b>33 (3)</b>  | 1; 0.98; <b>1.8</b>       |
|   |             | 16.88       | 5060          | 3.37        | 29 (2.6)   | 1; 12; <b>9</b>           |
|   |             | 26.21       | 7860          | 5.25        | 25 (2.3)   | 1; 0.34; <b>0.91</b>      |
| 64°YX-LiTaO <sub>3</sub>                            | 0.875       | 10.64       | 2130          | 1.42        | 20 (1.4)   | 1; 0.8; <b>1.7</b>        |
|   |             | 10.38       | 3100          | 2.07        | 15.5 (1.4)   | 1; 0.25; <b>1.5</b>       |
| ST, X-SiO <sub>2</sub>                              | 1.67        | 11.66       | 3500          | 2.33        | 19 (1.7)   | 1; 0.2; <b>1.5</b>        |
|   |             | 11.2        | 3360          | 2.25        | 21 (1.9)   | 1; 0; <b>1.5</b>          |
| YZ-LiNbO <sub>3</sub>                               | 1.67        | 11.2        | 3360          | 2.25        | 21 (1.9)   | 1; 0; <b>1.5</b>          |
| YZ-LiNbO <sub>3</sub>                               | 1.75        | 16.97       | 3400          | 2.27        | <b>32 (4)</b>  | 1; 0; <b>1.5</b>          |
| YZ+30°-LiNbO <sub>3</sub>                           | 1.75        | 54.9        | 10 100        | 6.75        | 20.5 (2.6)   | 1; 0; <b>0.91</b>         |
|   |             | 17          | 3400          | 2.27        | <b>29 (3.6)</b>                                      | 1; 0.5; <b>1.4</b>        |
| 128°YX+30°-LiNbO <sub>3</sub>                       | 1.75        | 18.85       | 3800          | 2.53        | 21 (2.6)   | 1; 0.8; <b>1.3</b>        |
| 128°YX+90°-LiNbO <sub>3</sub>                       | 2.5         | 25.8        | 5160          | 3.44        | 20.5 (2.6)   | 1; 21; <b>11</b>          |
|   |             | 29.18       | 5850          | 3.9         | <b>22 (2.75)</b>                                     | 1; 24; <b>18</b>          |
| YZ -LiTaO <sub>3</sub>                              | 2.5         | 56.67       | 11 350        | 7.57        | <b>22 (2.75)</b>                                     | 1; 0; <b>2.2</b>          |
| Акустические моды с малыми радиационными потерями   |             |             |               |             |  |                           |
| ST, X-SiO <sub>2</sub>                              | 1.67        | 33.06       | 9900          | 6.6         | 0  | 1; 1.5; <b>0.17</b>       |
| ST, X-SiO <sub>2</sub>                              | 1.67        | 36.22       | 10900         | 7.3         | 2  | 1; 2.1; <b>0.042</b>      |
| ST, X-SiO <sub>2</sub>                              | 1.67        | 42.91       | 12900         | 8.6         | 0.2  | 1; <b>7.7; 1.1</b>        |

*Примечание.* Тестируемая жидкость – дистиллированная вода, скорость ПАВ в жидкости  $V_{ж} = 1500$  м/с,  $V_n^T$  и  $V_n$  – теоретически рассчитанная и экспериментально измеренная скорости акустических волн Лэмба соответственно,  $U^T$  – теоретически рассчитанные компоненты механического смещения для исследуемых волн Лэмба на поверхности пластины в отсутствие жидкости. Полужирным выделены значения  $\Delta S_{12}$  с большими потерями, обладающие большими значениями  $U_3$ .



**Рис. 3.** Измеренные амплитудно-частотные характеристики волн Лэмба различных порядков, распространяющихся в пластине в пластине ST, X-SiO<sub>2</sub> толщиной  $h/\lambda = 1.67$ : 1 – пластина без жидкости, 2 – пластина с дистиллированной водой между преобразователями; толстыми стрелками указаны моды с большими радиационными потерями, тонкими – моды с малыми радиационными потерями.

блюдаются именно благодаря одновременному влиянию большой разницы скоростей  $V_n/V_{ж}$  и малого смещения  $U_3$ .

Поляризация большинства мод, сильно излучающих в жидкость, представляет собой эллипс, близкий к сагиттальной плоскости ( $U_1, U_3$ ) и вытянутый вдоль компоненты  $U_3$ . Вместе с тем обе сильно излучающие моды в пластине 128°YX + 90°-LiNbO<sub>3</sub> ( $h/\lambda = 2.5$ ) и одна из мод (16.88 МГц) в пластине 36°YX-LiTaO<sub>3</sub> ( $h/\lambda = 1.67$ ) (см. табл. 1) обладают необычной поляризацией. У этих мод  $U_1 \ll U_2, U_3$  и сдвиг фаз между  $U_2$  и  $U_3$  близок  $\pi/2$ . В связи с этим результирующее смещение данных мод представляет собой эллипс, плоскость которого почти перпендикулярна направлению распространения и поверхности пластины.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиационные потери  $\Delta S_{12}$  высокоскоростных волн Лэмба в пьезоэлектрической пластине, контактирующей с жидкостью, зависят от нормальной компоненты смещения  $U_3$  на поверхности пластины. Эта зависимость прослеживается как для

мод нулевого и высших порядков, распространяющихся в одной и той же пластине, так и для мод, существующих в пластинах из разных материалов и толщин. Благодаря зависимости от  $U_3$  изменение  $\Delta S_{12}$  с частотой мод  $f_n$  приобретает немонотонный характер, а диапазон изменений колеблется от 0 до 4 дБ/мм, в своем верхнем пределе приближаясь к значению радиационных потерь для поверхностных акустических волн в тех же материалах.

Поляризация мод, сильно излучающих в жидкость, представляет собой эллипс, сильно вытянутый вдоль компоненты  $U_3$ . У большинства мод плоскость эллипса близка сагиттальной плоскости, но у части из них она почти перпендикулярна этой плоскости и поверхностям платины. Моды с такой поляризацией – это новая модификация волн Лэмба.

С практической точки зрения волны Лэмба, обладающие большими радиационными потерями, должны обладать и высокой чувствительностью к адсорбции водяных паров. В связи этим такие волны привлекательны для датчиков влажности, не требующих дополнительных влагочувствительных покрытий. Напротив, волны Лэмба с низкими радиационными потерями и, следовательно, низкой чувствительностью к адсорбции водяных паров, могут быть полезны для невакуумированных акустоэлектронных устройств, в случае необходимости снижения зависимости их работы от влажности окружающей среды.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00708П).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрайден Дж. Мир электроники. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2006.
2. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966.
3. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Borodina I.A. et al. // Ultrasonics. 2004. V. 42. № 1–9. P. 179. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.01.006>
4. Smirnov A., Anisimkin V., Voronova N. et al. // Sensors. 2022. V. 22. № 19. P. 7231. <https://doi.org/10.3390/s22197231>
5. Caliendo C. // Sensors. 2015. V. 15. № 6. P. 12841. <https://doi.org/10.3390/s150612841>
6. Terakawa Y., Kondoh J. // Jpn. J. Appl. Phys. 2020. V. 59. SKKC08. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab84ac>
7. White R.M., Wicher P.J., Wenzel S.W., Zellers E.T. // IEEE Trans. 1987. V. UFFC-34. № 2. P. 162. <https://doi.org/10.1109/T-UFFC.1987.26928>
8. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Joshi S.G., Teplykh A.A. // Acoust. Phys. 2007. V. 53. № 5. P. 557. <https://doi.org/10.1134/S1063771007050041>
9. Anisimkin I.V., Anisimkin V.I. // IEEE Trans. 2006. V. UFFC-53. № 8. P. 1487. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2006.1665106>
10. Hamidullah M., Elie-Caille C., Leblais T. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2022. V. 55. № 9. P. 094003. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac39c5>
11. Mansoorzare H., Shahraini S., Todi A. et al. // IEEE Trans. 2020. V. UFFC-67. № 6. P. 1210–1218. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2019.2955402>
12. Anisimkin V., Shamsutdinova E., Li P. et al. // Sensors. 2022. V. 22. № 7. P. 2727. <https://doi.org/10.3390/s22072727>
13. Anisimkin V.I., Voronova N.V. // Ultrasonics. 2021. V. 116. Article No. 106496. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2021.106496>
14. Anisimkin V., Kolesov V., Kuznetsova A. et al. // Sensors. 2021. V. 21. № 3. P. 919.
15. Adler E.L., Slaboszewics J.K., Farnell G.W., Jen C.K. // IEEE Trans. 1990. V. UFFC-37. № 3. P. 215.
16. Slobodnik A.J., Jr., Conway E.D., Delmonico R.T. // J. Acoust. Soc. Am. 1974. V. 56. № 4. P. 1307.