

Влияние жидкости с различной проводимостью, вязкостью и диэлектрической проницаемостью на характеристики щелевой моды в акустической линии задержки

И. А. Бородина,* Б. Д. Зайцев, А. А. Теплых

*Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН,
Саратовский филиал*

Россия, 410019, Саратов, ул. Зеленая, д. 38

(Статья поступила 30.06.2017; Подписана в печать 12.09.2017)

Экспериментально исследовано влияние жидкости с различной проводимостью, диэлектрической проницаемостью и вязкостью на характеристики щелевой моды в структуре, состоящей из линии задержки с поперечно-горизонтальной волной и верхней пластины, разделенных воздушным зазором. Линия задержки была выполнена из Y-X ниобата лития, верхняя пластина — из Z-X ниобата лития. Возбуждение щелевой моды приводило к острым резонансным пикам на частотных зависимостях полных потерь и фазы выходного сигнала линии задержки. Установлено, что глубина и частота этих пиков зависят от указанных параметров жидкости, контактирующей с верхней пластиной. Показана возможность использования щелевой моды в исследуемой структуре для идентификации жидкостей с различными значениями проводимости, вязкости и диэлектрической проницаемости.

PACS: 43.20+g

УДК: 534.2

Ключевые слова: щелевая мода, пьезоэлектрическая пластина, поперечно-горизонтальная акустическая волна, резонансные пики на частотной зависимости полных потерь, вязкость, проводимость и диэлектрическая проницаемость жидкости.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что акустические волны, распространяющиеся в тонких по сравнению с длиной волны пьезоэлектрических пластинах, обладают высоким значением коэффициента электромеханической связи [1], и электрические поля, сопровождающие такие волны, глубоко проникают в вакуум. Ранее была показана возможность использования этого свойства для бесконтактного возбуждения акустической волны в пьезоэлектрической пластине, расположенной с некоторым зазором над линией задержки с распространяющейся пьезоактивной поперечно-горизонтальной акустической волной нулевого порядка (SH0) [2]. Линия задержки и верхняя пластина были выполнены из Y-X ниобата лития и Z-X ниобата лития, соответственно. Возбуждение щелевой моды в такой структуре приводило к появлению ярко выраженных резонансных пиков на частотных зависимостях полных потерь и фазы выходного сигнала линии задержки. Была показана возможность использования этой структуры для оценки акустических свойств различных пьезоэлектрических материалов. В настоящей работе экспериментально исследовано влияние жидкости с различными значениями электрической проводимости, вязкости и диэлектрической проницаемости, контактирующей с верхней пластиной, на характеристики щелевой моды в подобной структуре.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве основного элемента устройства для исследования влияния жидкости на щелевую моду использовалась линия задержки на основе пьезоэлектрической пластины Y-X ниобата лития (I) толщиной 200 мкм (рис. 1). На поверхности пластины были нанесены два встречно-штыревых преобразователя (ВШП) для возбуждения и приема акустической волны с поперечно-горизонтальной поляризацией нулевого порядка (SH0) на центральной частоте ~ 3.5 МГц. Над звукопроводом линии задержки между ВШП помещалась жидкостная ячейка объемом 1.5 мл. Дно ячейки было изготовлено из пластины Z-X ниобата лития (II), ось X которой была параллельна волновому вектору SH0 волны в линии задержки. Выбор пьезопластины, являющейся дном жидкостной ячейки, основан на результатах ранее проведенных исследований щелевой волны в структуре, состоящей из двух пьезоэлектрических пластин, разделенных воздушным зазором [2]. Фиксированный зазор между поверхностью линии задержки и дном жидкостной ячейки обеспечивался с помощью полосок алюминиевой фольги толщиной 8 мкм.

При помощи измерителя S-параметров E5071C («Agilent», США) проводились измерения полных потерь и фазы выходного сигнала устройства. Сначала были измерены характеристики устройства с ячейкой без жидкости. Было установлено наличие ярко выраженных резонансных пиков на частотной зависимости полных потерь, связанных с возбуждением щелевой моды (рис. 2) [2]. Затем жидкостная ячейка заполнялась жидкостью с различными значениями проводимо-

*E-mail: borodinaia@yandex.ru

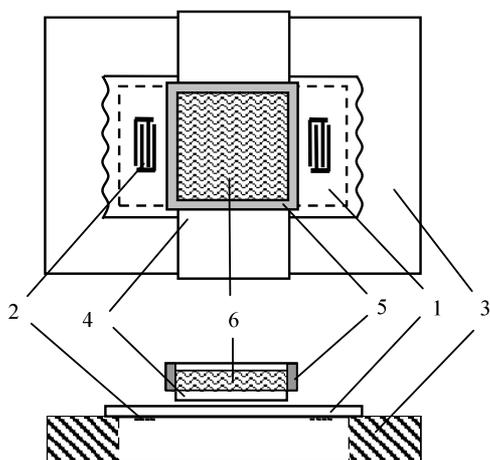


Рис. 1: Схема исследуемой линии задержки: 1 — пьезоэлектрическая пластина I (Y-X LiNbO₃), 2 — ВШП, 3 — держатель из оргстекла, 4 — пьезоэлектрическая пластина II (Z-X LiNbO₃), 5 — жидкостная ячейка, 6 — исследуемая жидкость

сти, диэлектрической проницаемости и вязкости, и измерялись частотные зависимости полных потерь выходного сигнала линии задержки с нагруженной жидкостью ячейкой.

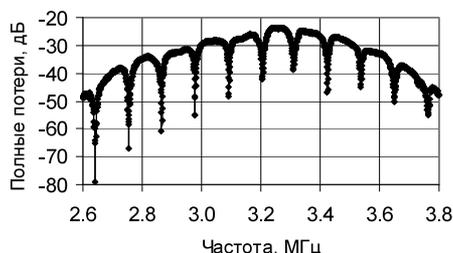


Рис. 2: Частотная зависимость полных потерь в исследуемом устройстве с пустой ячейкой

2. ВЛИЯНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ЖИДКОСТИ НА ЩЕЛЕВУЮ МОДУ

Для исследования влияния проводимости жидкости на свойства щелевой моды в исследуемой структуре использовался водный раствор хлористого натрия. Проводимость жидкости определялась кондуктометром NI8733 («Наппа», США). Жидкостная ячейка заполнялась исследуемым проводящим раствором, и измерялись частотные зависимости полных потерь линии задержки. По этим зависимостям оценивались частота и глубина резонансных пиков. Проводимость раствора менялась от 2 до 25000 мкСм/см. На рис. 3 представлены измеренные частотные зависимости полных потерь выходного сигнала линии задержки для значений проводимости водного раствора: *a* — 2.8, *b* — 250 и *в* —

10000 мкСм/см.

Видно, что при добавлении в ячейку водного раствора хлористого натрия глубина резонансных пиков значительно уменьшается по сравнению с глубиной пиков для пустой ячейки. При этом глубина пиков зависит от проводимости водного раствора и становится минимальной при проводимости 250 мкСм/см. Частота этих пиков также меняется с изменением проводимости. На рис. 4 представлены зависимости частоты (*a*) и глубины (*b*) резонансного пика от проводимости водного раствора хлористого натрия вблизи частоты 2.8 МГц. Видно, что с увеличением проводимости частота резонансного пика уменьшается (рис. 4, *a*). Характерный максимум на зависимости глубины пика от проводимости водного раствора (рис. 4, *b*), который соответствует проводимости 250 мкСм/см, по всей видимости, связан с совпадением частоты волны с частотой максвелловской релаксации [3]. Данная зависимость находится в качественном соответствии с кривой, полученной в [3] для волны с поперечно-горизонтальной поляризацией, распространяющейся в тонкой пластине ниобата лития, граничащей с проводящей жидкостью.

3. ВЛИЯНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКОСТИ НА ЩЕЛЕВУЮ МОДУ

В качестве жидкости с различной диэлектрической проницаемостью использовались дистиллированная вода, этанол (C₂H₅OH) и водно-спиртовой раствор с различным процентным содержанием этанола в воде. Измерение диэлектрической проницаемости осуществлялось с помощью плоского конденсатора, погружаемого в исследуемую жидкость, и измерителя LCR параметров 4285A («Agilent», США). Как и в предыдущем случае, при добавлении жидкости в исследуемую ячейку наблюдалось уменьшение глубины и смещение частоты резонансных пиков по сравнению с пустой ячейкой. В ходе эксперимента в жидкостную ячейку добавлялись образцы жидкости с различной диэлектрической проницаемостью от 26.9 до 78.3 и измерялись соответствующие частотные зависимости полных потерь. Было установлено, что с ростом диэлектрической проницаемости наблюдается смещение резонансных пиков по частоте (рис. 5, *a*) и уменьшение их глубины (рис. 5, *b*).

4. ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ НА ЩЕЛЕВУЮ МОДУ

Для изучения влияния вязкости жидкости на свойства щелевой моды в исследуемой структуре использовались дистиллированная вода, глицерин и водный раствор глицерина. Вязкость исследуемой жидкости менялась от 954 мПа·с (чистый глицерин) до 0.7 мПа·с (дистиллированная вода). Вязкость жидко-

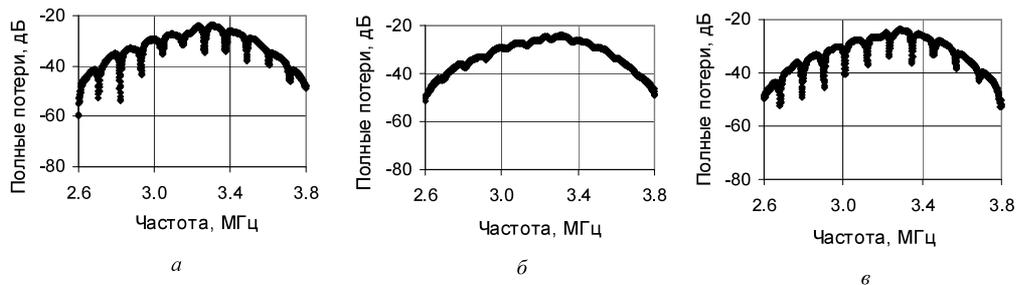


Рис. 3: Частотные зависимости полных потерь в исследуемом устройстве с ячейкой, нагруженной водным раствором хлористого натрия с проводимостью: *a* — 2.8, *б* — 250 и *в* — 10000 мкСм/см

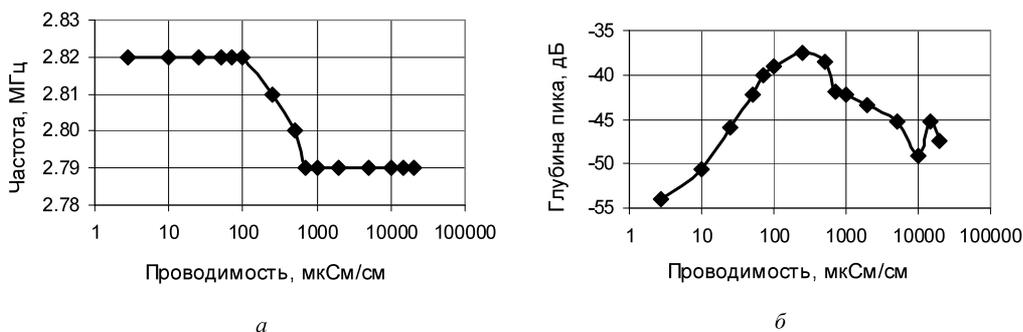


Рис. 4: Зависимости *a* — частоты и *б* — глубины резонансного пика от проводимости водного раствора хлористого натрия вблизи частоты 2.8 МГц

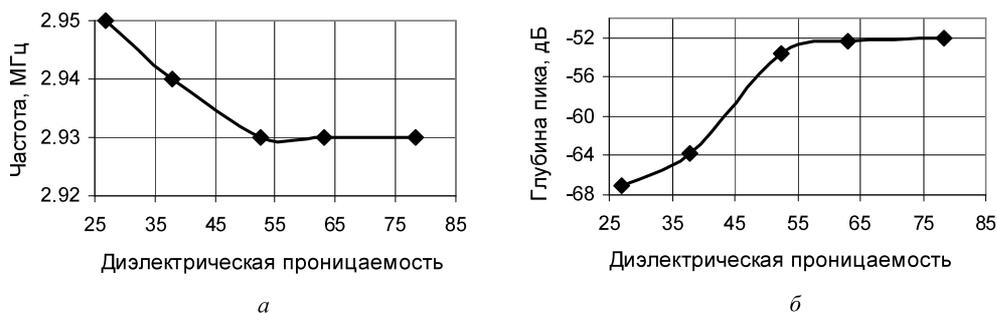


Рис. 5: Зависимости *a* — частоты и *б* — глубины резонансного пика от диэлектрической проницаемости жидкости ϵ вблизи частоты 2.9 МГц

сти определялась вискозиметром SV-10 («A&D», Япония). Жидкостная ячейка заполнялась исследуемой жидкостью, и проводилось измерение частотной зависимости полных потерь выходного сигнала линии задержки. Оказалось, что в отличие от предыдущих случаев частота пиков не зависела от вязкости жидкости (рис. 6,*a*). Однако увеличение вязкости жидкости приводило к уменьшению глубины резонансных пиков (рис. 6,*б*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что присутствие жидкости приводит к изменению частоты и глу-

бины резонансных пиков. При этом значения полных потерь вне резонансных пиков остаются точно такими же, как и для пустой ячейки. Это означает, что присутствие жидкости приводит к изменению скорости и затухания акустической волны только в верхней пластине. Однако полная физика явлений может быть прояснена только после теоретического анализа структуры, который позволит определить распределение компонент механического смещения в обеих пластинах и жидкости, а также распределение электрического потенциала в пластинах, жидкости и в прилегающем воздухе (вакууме). В целом, полученные результаты показывают возможность использования устройства

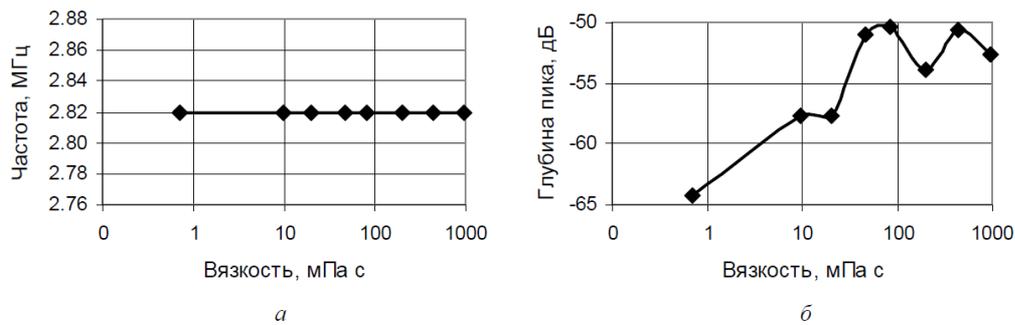


Рис. 6: Зависимости a — частоты и b — глубины резонансного пика от вязкости жидкости вблизи частоты 2.8 МГц

на основе линии задержки с поперечно-горизонтальной волной для идентификации жидкостей с различными значениями проводимости, вязкости и диэлектрической

проницаемости.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-07-00818а.

- [1] Бородина И. А., Джоши С. Г., Зайцев Б. Д., Кузнецова И. Е. Акуст. журн. 2000. **46**, № 1. С. 42.
[2] Borodina I. A., Zaitsev B. D., Kuznetsova I. E., Teplykh A. A. Trans. on Ultrason., Ferroel. and Freq. Contr. 2013. **60**, N 12. P. 2677.

- [3] Zaitsev B. D., Kuznetsova I. E., Joshy S. G., Borodina I. A. IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelectr. and Freq. Contr. 2001. **48**, N 2. P. 627.

The influence of the liquid with various values of conductivity, viscosity, and permittivity on characteristics of slot wave in acoustic delay line

I. A. Borodina^a, B. D. Zaitsev, A. A. Teplykh

Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS
Saratov Branch, Saratov, 410019, Russia
E-mail: ^aborodinaia@yandex.ru

The influence of the liquids with various values of conductivity, permittivity, and viscosity on characteristics of slot mode in the structure consisting of delay line with shear — horizontal plate wave and upper plate separated by air gap was experimentally studied. Delay line and upper plate were made of Y-X lithium niobate and Z-X lithium niobate, respectively. The excitation of the slot mode led to the appearance of the sharp resonant peaks on the frequency dependencies of insertion loss and phase of output signal of delay line. It has been found that the depth and frequency of these peaks depend on pointed properties of liquid contacting with upper plate. The possibility of the identification of liquids with various values of conductivity, permittivity, and viscosity has been demonstrated.

PACS: 43.20+g

Keywords: slot mode, piezoelectric plate, shear-horizontal acoustic wave, resonant peaks on frequency dependence of insertion loss, viscosity, conductivity, and permittivity of liquid.

Received 30 June 2017.

Сведения об авторах

1. Бородина Ирина Анатольевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (452) 27-24-01, e-mail: borodinaia@yandex.ru.
2. Зайцев Борис Давыдович — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией; тел.: (452) 27-24-01, e-mail: zai-bogis@yandex.ru.
3. Теплых Андрей Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (452) 27-24-01, e-mail: teplykhaa@mail.ru.