

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534. 212

ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОЛНЫ РЭЛЕЯ В ВЫТЕКАЮЩУЮ НА ГРАНИЦЕ  
ТВЕРДОГО ТЕЛА И ЖИДКОСТИ

Арапов А. В., Гончаров В. С.

Волновое поле со структурой, близкой к структуре вытекающей волны, возбуждается при падении волны Рэля на границу раздела жидкость — твердое тело [1]. Знание деталей процесса такой трансформации необходимо при разработке методики измерения параметров вытекающей волны, оценки предельной точности измерения скорости звука в жидкости по данным о распространении акустических волн в системе твердое тело — жидкость — твердое тело [2]. Результаты [3] позволяют сделать ряд выводов о динамике трансформации, реальной структуре поля компоненты вытекающей волны в жидкости, в том числе измерить декремент вытекающей волны. Однако акустическая методика, использованная в [3], имеет ряд существенных ограничений. Низка точность измерения амплитуд, ограничен частотный диапазон. В работе не исследованы эффекты, связанные с длиной формирования вытекающей волны, возбуждением рассеянных полей в твердом теле.

Цель работы — разработка методик исследования эффектов трансформации волны Рэля в вытекающую на частотах  $\sim 100$  МГц и измерения величины декремента вытекающей волны  $\alpha$ . Ее достижение связываем с акустоэлектронными способами возбуждения рэлеевской волны и регистрацией изменения амплитуды вытекающей волны при изменении длины ее распространения. Необходимую точность измерения декремента вытекающей волны можно получить в случае, если длина взаимодействия вытекающей волны измеряется с точностью до единиц микрон.

Для исследований используется экспериментальное устройство, изображенное на рис. 1. На поверхности ниобата лития YZ-среза наносятся излучающий 1 и приемный 2 встречно-штыревые преобразователи (ВШП). Вблизи ВШП 2 располагается решетка 3 из десяти полосок алюминия шириной 10 мкм и толщиной 100–150 нм. Расстояние между полосками меняется от 20 до 100 мкм. Каждая полоска в решетке покрыта слоем задубленного фоторезиста. Точности задания ширины полоски и расстояния между ними определяются ошибками при создании фотошаблона и при изготовлении образца и составляют  $\pm 1$  мкм. Измерения параметров радиосигналов, соответствующих возбуждению рэлеевской волны и регистрации вытекающей волны, проводятся в непрерывном режиме на частоте синхронизма ВШП. Сигнал с генератора Г4-107 подается на ВШП 1. Принятый с ВШП 2 сигнал направляется на измеритель разности фаз ФК2-12, который работает в режиме измерения амплитуды. Сигнал постоянного тока с выхода ФК2-12, величина которого пропорциональна амплитуде высокочастотного сигнала на входе, подается на цифровой вольтметр. Цифровой вольтметр обеспечивает точность измерения изменений амплитуды сигнала на выходе экспериментального устройства  $\pm 10^{-3}$  дБ. Установлено, что величина отклонения проходной характеристики тракта от линейной зависимости при уровнях сигнала с генератора 0–5 дБ не превышает  $\pm 5 \cdot 10^{-3}$  дБ, а при уровнях –5––10 дБ не превышает  $\pm 10^{-2}$  дБ.

Последовательность операций осуществляется следующим образом. На поверхность подложки на ВШП 2 наносится жидкость. Капля жидкости «натягивается» последовательно на ВШП 2 и край любой из полосок в решетке 3. Вследствие разницы коэффициентов поверхностного натяжения жидкости на ниобате лития и на фоторезисте края капли и полоски удается совместить и зафиксировать. Точность фиксации края капли по визуальным наблюдениям составляет  $\pm 2$  мкм. Затем при каждом шаге измеряется величина изменения амплитуды сигнала на цифровом вольтметре. В качестве точки отсчета взят ближайший к решетке штырь ВШП 2. Расстояние от точки отсчета до края полосок в решетке определяет длину взаимодействия вытекающей волны. В измерениях использовались вода и глицерин.

На рис. 2 представлены результаты измерения изменения амплитуды сигнала с выхода экспериментального устройства при перемещении края капель жидкости по решетке. Поскольку акустические свойства воды и глицерина отличаются, частоты синхронизма соответственно составляют  $f=69,75$  и  $f=71,08$  МГц. По оси абсцисс отложена длина взаимодействия  $l$ . Представленные на рис. 2 зависимости близки к линейным. Существующие отклонения более отчетливо видны на рис. 3, а, б. Здесь

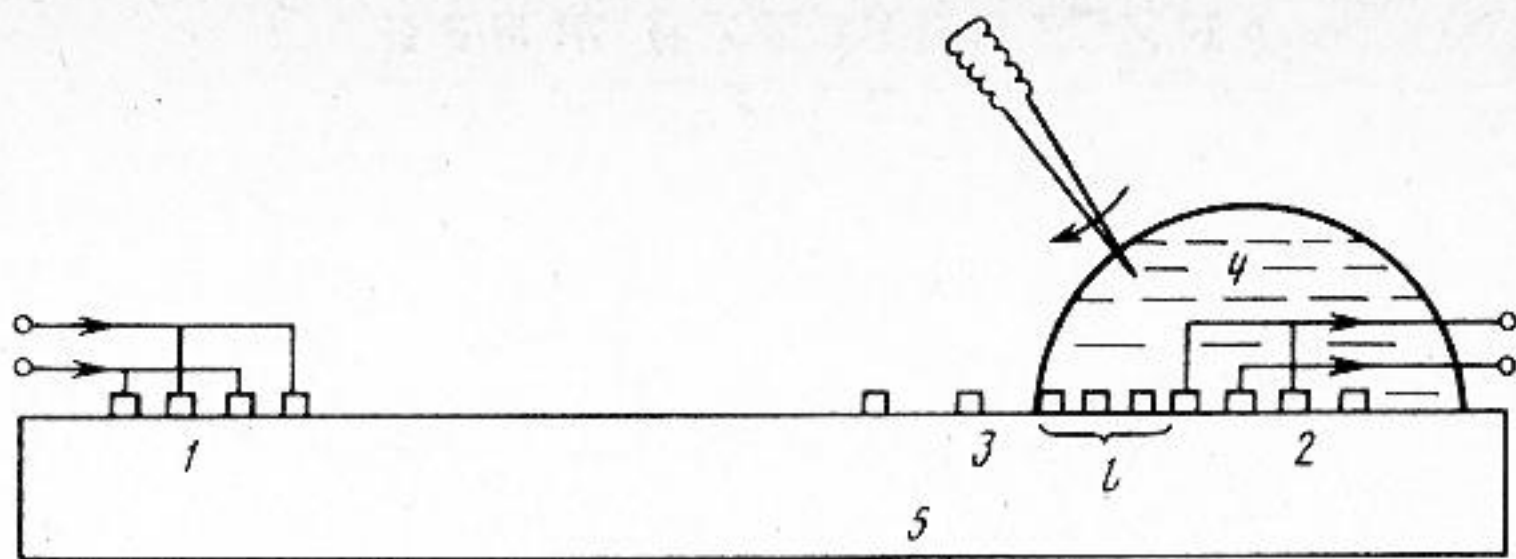


Рис. 1. Схема экспериментального устройства: 1, 2 - излучающий и приемный встречно-штыревые преобразователи, 3 - решетка металлических электродов, покрытых слоем фоторезиста, 4 - капля жидкости, 5 - подложка ниобата лития YZ-среза

изображены зависимости  $\Delta\alpha = u_1 - u_2$  от длины взаимодействия,  $u_1$  - экспериментальные, а  $u_2 = \alpha fl$  - расчетные значения величины изменения амплитуды сигнала, связанного с вытекающей волной на выходе экспериментального устройства в дБ,  $\alpha = 1,956$  дБ/см·МГц,  $\alpha = 3,395$  дБ/см·МГц - расчетные значения для систем с водой и глицерином соответственно. На этих фигурах указаны доверительные интервалы экспериментальных данных.

Для объяснения полученных результатов рассмотрим следующую физическую картину. ВШП 1 наряду с поверхностной волной Рэлея излучает приповерхностную объемную сдвиговую волну, которая регистрируется ВШП 2. Волна Рэлея достигает границы раздела с каплей жидкости и трансформируется в вытекающую волну, которая также регистрируется ВШП 2. В процессе трансформации возбуждаются рассеянные сдвиговые волны вертикальной поляризации, которые частью уходят от границы раздела, частью преломляются в жидкость, а частью регистрируются ВШП 2. Из центра рассеяния площадь ВШП 2 «видна» под телесным углом, который быстро уменьшается, когда центр отодвигается от края ВШП. При условии  $0 < l < 100$  мкм эффекты интерференции волн, попадающих в площадь преобразователя, являются существенными. Это проявляется в резких изменениях амплитуды сигнала на ВШП 2. С увеличением  $l$  вклад эффекта уменьшается и при  $l > 100$  мкм экспериментальная кривая становится плавной.

Эта физическая картина при  $l > 100$  мкм поддается простому математическому моделированию. Комплексная амплитуда волн на приемной ВШП записывается в виде

$$u(l) = u_0 [\exp(ik_R(l_0 - l - \Delta) + ik_L l - \alpha l) f(\alpha) \exp(ik_L \Delta) - \delta_1 i \exp(ik_R(l_0 - l - \Delta) + ik_L(l + \Delta)) + \delta_2 \exp(ik_L l_0)],$$

где  $l_0$ ,  $\Delta$ ,  $l$  - расстояния между преобразователями, от центра ВШП 2 до ближайшего к решетке штыря ВШП, от этого штыря до края капли жидкости соответственно,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  - отношения амплитуд сдвиговых волн, возбуждаемых при трансформации рэлеевской волны в вытекающую и входным ВШП, к уровню амплитуды в волне Рэлея,  $f(\alpha)$  - фактор, характеризующий амплитуду вытекающей волны при покрытии жидкостью только приемного преобразователя,  $k_R$ ,  $k_L$ ,  $k_L$  - волновые числа рэлеевской, сдвиговой и вытекающей волн. В модели содержится три подгоночных параметра:  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  и  $\alpha$ . Наблюдение за амплитудой сигнала на ВШП 2 при  $l \gg \alpha^{-1}$  позволяет определить, что  $\delta_1 \sim \delta_2 \sim 0,01$  для систем с водой и глицерином. Эти значения  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  и расчетные значения для  $\alpha$  взяты в качестве начальных приближений подгонки. При подгонке осуществляется минимизация разности экспериментальных  $\Delta\alpha$  и эквивалентных расчетных значений.

В модели обосновываются следующие моменты: в области решетки в местах металлизации величина декремента вытекающей волны значительно ( $\sim 10\%$ ) превышает величину декремента для неметаллизированной границы раздела; эффекты, связанные с изменением коэффициентов рассеяния от металлических полосок при нагрузке жидкостью, не учитываются.

Результаты наилучшей подгонки представлены на рис. 3, а, б сплошными линиями. Значения подгоночных параметров составляют:  $\alpha = 1,830$  дБ/см·МГц,  $\delta_1 = 0,006$ ,  $\delta_2 = 0,009$  с соответствующей точностью 0,25, 23 и 13% для структуры с водой и  $\alpha = 3,405$  дБ/см·МГц,  $\delta_1 = 0,01$ ,  $\delta_2 = 0,008$  с соответствующей точностью 0,86, 30 и 30% для структуры с глицерином. Достигнутая точность определяется неоднозначностью восстановления параметров при имеющейся дисперсии экспериментальных данных.

Характерная амплитуда рассеянных сдвиговых волн имеет величину  $\alpha/k_R$  относительно амплитуды волны Рэлея. Для воды и глицерина на ниобате лития эта величина составляет  $1,24 \cdot 10^{-2}$  и  $2,14 \cdot 10^{-2}$  соответственно. Полученные при подгонке значения  $\delta_1$  близки по порядку  $\alpha/k_R$ . Отношение  $\alpha_{гл}/\alpha_{H_2O} = 1,7$ , а отношение  $\delta_{1гл}/\delta_{1H_2O} = 2 \pm 0,5$ . Можно сделать вывод о достоверности представленной физической картины возбуждения вытекающей волны.

В заключение отметим, что для измерения величины декремента вытекающей волны измеряется амплитуда сигнала на выходе экспериментального устройства. Для выделения вклада рассеянных сдвиговых волн необходимо провести измерение

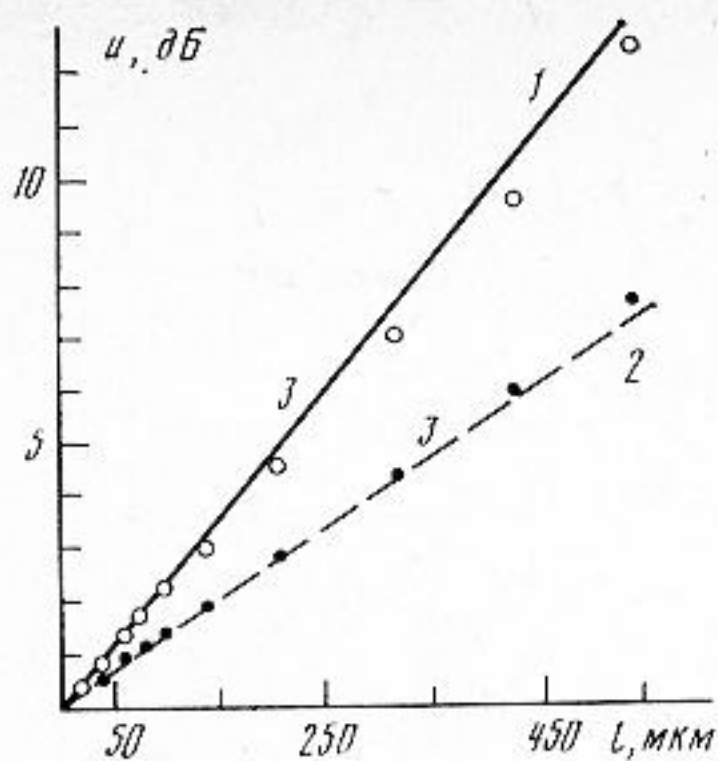


Рис. 2. Изменение амплитуды сигнала на выходе экспериментального устройства от длины взаимодействия: 1, 2 — глицерин, вода, 3 — расчет по формуле  $u = \alpha fl$

Рис. 3. Отклонение экспериментальных зависимостей от расчетных: а, б — глицерин, вода

Рис. 2

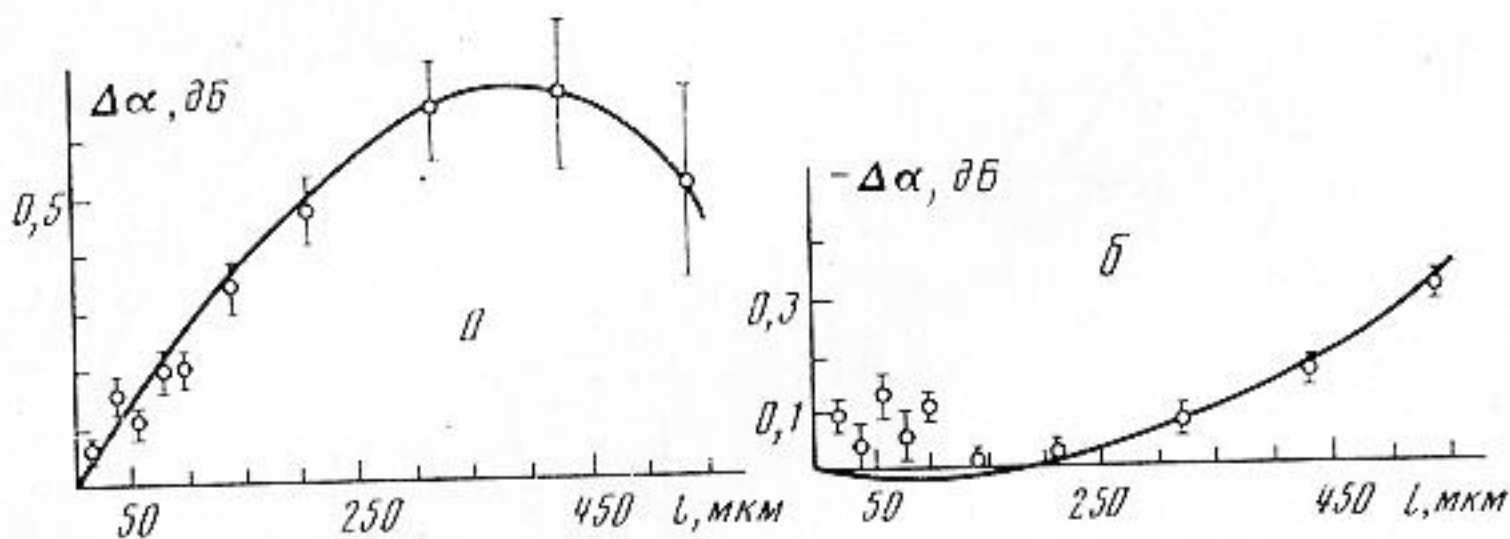


Рис. 3

их амплитуд и иметь слой жидкости длиной  $l \sim 2\pi / (k_{12} - k_1)$ ,  $k_R$  — волновое число сдвиговой волны. Часть спектра рассеянных сдвиговых волн создают на границе раздела нормальные компоненты смещения и преломляются в жидкость. Преломленные волны уходят от границы раздела под углами  $\theta_R < \theta < \pi/2$ , где  $\theta_R$  — угол Рэля. Характерная амплитуда этих волн имеет порядок величины  $Z_f/Z_t \sim \alpha k_R$  относительно амплитуды сдвиговых волн,  $Z_f, Z_t$  — акустические импедансы жидкости и твердого тела. Отсюда следует, что на волновое поле вытекающей волны в жидкости накладывается спектр преломленных волн с характерными величинами амплитуд  $\sim \alpha^2/k_R^2$  относительно амплитуды волны Рэля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 136 с.
2. Арапов А. В., Гончаров В. С., Яковкин И. Б. Волны утечки в слоистой системе с жидкостью // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 6. С. 724–725.
3. Васькова В. И., Викторов И. А., Талашев А. А. Дифракция света на поверхностных волнах на границе раздела твердое тело — жидкость // Акуст. журн. 1977. Т. 23. № 4. С. 644–646.

Институт физики полупроводников  
СО Академии наук СССР

Поступило в редакцию  
10.VI.1988

УДК 534.222

### ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ САМОКОНЦЕНТРАЦИЯ МОЩНОГО УЛЬТРАЗВУКА В ЖИДКОСТИ С БОЛЬШОЙ ВЯЗКОСТЬЮ

Ассман В. А., Бункин Ф. В., Ляхов Г. А.,  
Проскураков А. К., Шипилов К. Ф.

Предложенный в [1] эффект акустической самофокусировки в жидкости после детального анализа оптимальных условий наблюдения [2] был реализован в [3] на тепловом механизме и затем неоднократно подтвержден в текучих и вязких жидкостях. При переходе от текучих жидкостей к вязким обнаружено при том же уровне звуковой мощности  $P \sim 10$  Вт новое акустическое явление, аналог оптического само-