

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 541.183.5+548.571

ОСОБЕННОСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВОДЯЩИХ ЖИДКОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ НОРМАЛЬНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

© 2022 г. В. И. Анисимкин^{а, *}, И. Е. Кузнецова^а, Е. С. Шамсутдинова^а^аИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая 11, стр. 7, Москва, Российская Федерация

*E-mail: anis@cplire.ru

Поступила в редакцию 04.03.2022 г.

После доработки 04.03.2022 г.

Принята к публикации 20.03.2022 г.

Показано, что при измерении электрических характеристик жидких проб с помощью нормальных акустических волн ключевое значение имеет снижение уровня электромагнитной наводки по сравнению с амплитудой акустического сигнала на величину не менее 10 дБ, что может быть обеспечено путем размещения тестируемой пробы в зазоре между встречно-штыревыми преобразователями на пластине и/или электронного подавления наводки в измерительном приборе. Обнаружено, что в отличие от акустоэлектронного взаимодействия объемных и поверхностных волн в пьезополупроводниках зависимость поглощения мод Лэмба в пьезопластинах от проводимости σ жидкостной нагрузки имеет несимметричный характер; при этом селективное измерение проводимости σ затруднено из-за перекрестной чувствительности волн к диэлектрическим ϵ_j и вязкостным η свойствам жидкости. Найдено, что при известных или слабо меняющихся значениях ϵ и η величина σ находится в диапазоне 0...10 См/м, чувствительность нормальных волн достигает 0.4 дБ/(См/м) по амплитуде и 4.4°/(См/м) по фазе, требуемый объем пробы составляет не более 200...500 мкл.

DOI: 10.31857/S0033849422080022

ВВЕДЕНИЕ

Нормальные акустические волны являются единственным типом акустических колебаний, позволяющим исследовать физические свойства жидких сред микролитрового объема, поскольку поверхностные волны при наличии жидкости испытывают сильное затухание, а объемные – требуют миллилитровых объемов. При распространении нормальных акустических волн в пьезоэлектрических пластинах, одна из поверхностей которых нагружена жидким веществом с ненулевой электропроводностью σ , электрические поля волн сжатия и растяжения проникают из пластины в жидкость на глубину порядка 10 мкм, взаимодействуют с электрическими зарядами и меняют скорость v и поглощение α этих волн. Подобное акустоэлектронное взаимодействие возникает между пьезоактивными акустическими волнами и носителями заряда в пьезополупроводниковых кристаллах [1], когда увеличение проводимости σ приводит к монотонному снижению скорости волн v и дополнительному поглощению α , которое симметрично относительно своего максимума. При этом, хотя диапазон σ , в котором наблюдаются указанные изменения, невелик (0.01...10 См/м [2–4]), этого оказывается достаточным для целого ряда применений, таких, например, как детекти-

рование суспензий [5], упорядоченных микроструктурированных дисперсных систем с биологическими объектами [6], бактерий [7], моторных масел [8] и пр. Большое число мод нормальных волн, возбуждаемых в пьезопластине, разнообразие сенсорных свойств этих мод и возможность управления их свойствами за счет изменения толщины пластины h , длины волны λ и номера моды n [9, 10] делает применение волн этого типа особенно привлекательным для таких применений.

Вместе с тем использование нормальных волн для измерения электрических характеристик жидкостей требует учета ряда важных особенностей. Так, необходимо знать, каковы зависимости скорости v и поглощения α от проводимости жидкостного слоя σ для обобщенных волн Лэмба высоких порядков, какова эффективность акустоэлектронного взаимодействия волн этого типа с носителями заряда в проводящих средах, какой может быть перекрестная чувствительность тех же волн к вязкости и диэлектрической проницаемости жидкостей, каково влияние на результаты акустических измерений электромагнитной наводки, величина которой может из-за электропроводности жидкости быть неприемлемо большой и исказить результаты измерений.

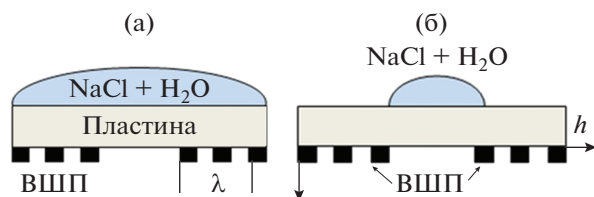


Рис. 1. Акустические линии задержки с полным (а) и частичным (б) перекрытием акустического пучка тестируемой жидкостью.

Цель данной работы – изучить акустоэлектронное взаимодействие волн Лэмба высоких порядков с проводящими жидкостями, сравнить чувствительность этих волн к проводимости жидкости с чувствительностью к вязкости и температуре жидкости, определить условия, исключаящие влияние электромагнитной наводки на результаты акустических измерений.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

Для проведения экспериментов по измерению электрических характеристик жидкостей были выбраны промышленно выпускаемые пластины LiNbO₃ поворотного 128° Y-среза (углы Эйлера 0°, 37.86°, Θ = 0° и 90°), поворотного 64° Y-среза (углы Эйлера 0°, –26°, Θ = 0° и 90°) и пластины LiTaO₃ поворотного 36° Y-среза (углы Эйлера 0°, –54°, 0° и 90°), толщина всех пластин $h = 500$ мкм. Пластины имели одну шлифованную (верхняя) и одну полированную (нижняя) поверхности. На полированной поверхности (оптический класс 14, горизонтальные неровности 0.01 мкм, вертикальные – 0.05 мкм) были расположены входной и выходной встречно-штыревые преобразователи (ВШП), период которых λ составлял либо 200, либо 300 мкм. Преобразователи имели 40 пар электродов из Cr (100 нм) и 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 неровности 0.16 мкм, вертикальные – 0.8 мкм) была расположена жидкостная кювета (тефлон), ширина которой превышала апертуру акустического пучка, что исключало ее влияние на распространение акустических волн. Длина кюветы варьировалась: она могла соответствовать либо полной длине пробега волны от начала одного до конца другого преобразователя (22, 24 или 32 мм) (рис. 1а), либо зазору между преобразователями (8, 10 или 22 мм) (рис. 1б). Сравнение полученных данных позволило выяснить, как влияет местоположение тестируемой жидкости на величину электромагнитной наводки и результаты измерений.

Измерения проводили с помощью анализатора четырехполосников KEYSIGHT 5061B, который в зависимости от задачи работал в амплитудно-частотном $S_{21}(f)$, амплитудно-временном $S_{21}(t)$ или фазово-временном $\varphi(t)$ режимах. Первый из них использовался для измерения амплитудно-частотных характеристик $S_{21}(f)$ акустических мод разных порядков, генерируемых в пластинах на соответствующих частотах $f_n = v_n/\lambda$, где n – порядок моды, v_n – ее скорость, λ – длина волны, равная периоду преобразователей. В этом режиме измерения выполняли либо без электронного подавления электромагнитной наводки, либо с ее подавлением в измерительном приборе (анализаторе). Во втором случае амплитудно-частотная характеристика $S_{21}(f)$ трансформировалась в амплитудно-временную $S_{21}(t)$, при этом электромагнитную наводку вырезали с помощью установки два раза: в момент начала отсечки и в момент ее окончания. Затем амплитудно-временной формат $S_{21}(t)$ трансформировался обратно в амплитудно-частотный $S_{21}(f)$, который уже не содержал электромагнитную наводку. Использование отсечки электромагнитной наводки в приборе KEYSIGHT 5061B также позволяло сравнить амплитудно-частотные характеристики разных мод $S_{21}(f)$ и отклики мод $\Delta S_{21}(t)$ и $\Delta\varphi(t)$, т.е. изменения вносимых потерь S_{21} и фазы φ при изменении проводимости жидкости – с электромагнитной наводкой и без нее. При этом сравнение абсолютных значений полной фазы φ на выходе разных акустических образцов было невозможно ввиду различия электронной составляющей полной фазы φ , меняющейся при изменении длины соединительных проводков, положения образцов в держателе и качества электрических контактов.

В качестве тестируемых жидкостей с переменной проводимостью σ и слабо меняющейся вязкостью η и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{ж}$ были использованы дистиллированная вода и водные растворы NaCl с переменной концентрацией соли. Это позволяло варьировать проводимость в диапазоне 0...10 См/м при слабых изменениях вязкости (менее 13%), плотности (менее 8%) и диэлектрической постоянной (менее 1%) [11]. Значение проводимости раствора определяли из табличных данных [11] по известным массам воды и NaCl.

В качестве тестируемых жидкостей с переменной вязкостью η и слабо меняющихся проводимостью σ и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{ж}$ использовали дистиллированную воду и водные растворы глицерина разной концентрации. Это позволяло варьировать вязкость от 1.003×10^{-3} Па с (вода) до 1491×10^{-3} Па с (глицерин) при слабых изменениях проводимости ($\sigma = 0$), плотности (<26%) и диэлектрической проницаемости (<10.5%) [11].

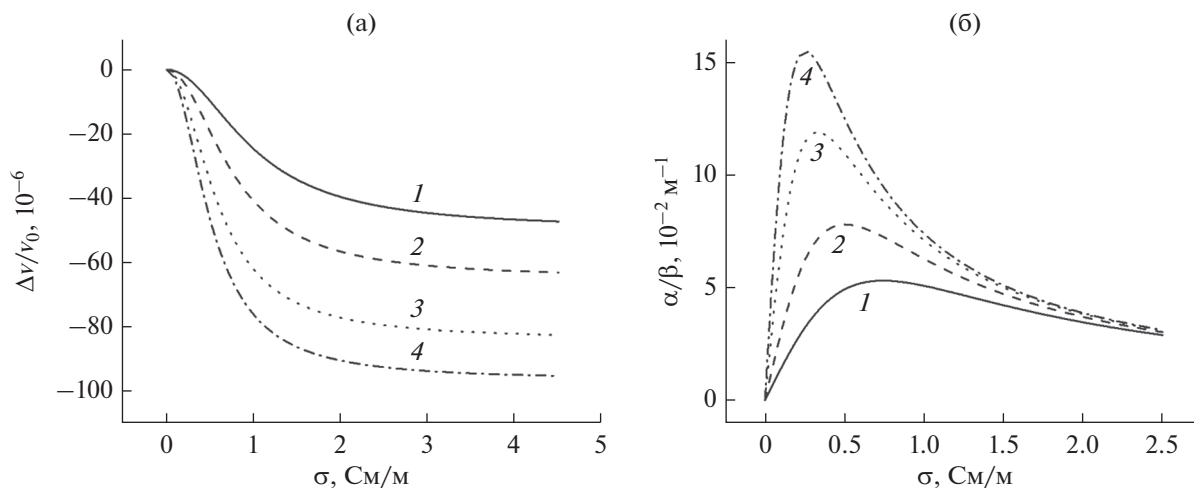


Рис. 2. Зависимость скорости (а) и поглощения (б) нормальных акустических мод от проводимости и диэлектрической проницаемости жидкости, нанесенной на одну из поверхностей пластины при $\epsilon_{ж}/\epsilon_0 = 79.3$ (1), 52.5 (2), 32.9 (3) и 24.2 (4).

Значения вносимых потерь S_{21} и фазы волны φ , соответствующие дистиллированной воде (200 мг), были приняты в качестве исходных. Изменения ΔS_{21} и $\Delta\varphi$ с проводимостью σ и вязкостью η измерялись как амплитудный и фазовый отклики волны на соответствующее воздействие: величина ΔS_{21} обуславливалась дополнительным поглощением волны α , а значение $\Delta\varphi$ — уменьшением ее скорости Δv ($\varphi = 2\pi fL/v$, L — расстояние между преобразователями). Значения ΔS_{21} и $\Delta\varphi$, измеренные для разных мод и пластин, сравнивали друг с другом и находили наилучшие. При этом фазовый отклик, который также менялся при изменении температуры, требовал ее постоянства в процессе измерений, а амплитудный — был температурнезависимым и мог использоваться без термостабилизации пластины и жидкости [9, 10].

Результаты измерений сравнивали с расчетными данными. При выборе методики расчета учитывалось, что задача о влиянии жидкости с произвольными электропроводящими и диэлектрическими свойствами на скорость и поглощение нормальных акустических волн в пьезопластинах ранее решалась различными способами — путем точного решения граничной задачи [12], с помощью теории возмущений [13] и с использованием модели эквивалентных цепей [2], причем разные способы давали близкие результаты. Поэтому нами были использованы два последних способа расчета как устанавливающие простую связь между акустическими ($\Delta v/v_0$, α) и электрическими (σ , $\epsilon_{ж}$) характеристиками [2]:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{k^2 \epsilon_{пл} + \epsilon_0}{2 \epsilon_{пл} + \epsilon_{ж}} \frac{\sigma \omega (\epsilon_{пл} + \epsilon_{ж})}{\sigma^2 + \omega^2 (\epsilon_{пл} + \epsilon_{ж})^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\Delta v}{v_0} = -\frac{k^2 \epsilon_{пл} + \epsilon_0}{2 \epsilon_{пл} + \epsilon_{ж}} \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + \omega^2 (\epsilon_{пл} + \epsilon_{ж})^2}, \quad (2)$$

где v_0 — скорость волны при нулевой проводимости жидкости, Δv — изменение скорости из-за ненулевой проводимости жидкости, k^2 — коэффициент электромеханической связи волны, β — волновое число, $\omega = 2\pi f$ — ее циклическая частота, $\epsilon_{ж}$ и $\epsilon_{пл}$ — диэлектрические постоянные жидкости и пластины соответственно. Поскольку формулы (1) и (2) не учитывают того факта, что моды разных порядков по-разному реагируют на одинаковые изменения электрических граничных условий, сравнение расчетных и экспериментальных данных носило качественный характер.

2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов представлены на рис. 2. Результаты измерений приведены на рис. 3–6 и табл. 1.

На рис. 2 результаты расчетов выполнены по формулам (1) и (2) для одной из мод, распространяющейся в пластине $128YX-LiNbO_3$ толщиной $h = 500$ мкм при диэлектрической постоянной $\epsilon_{пл} = 34\epsilon_0$ и для преобразователей с периодом $\lambda = 300$ мкм. Скорость моды $v = 14.093$ м/с, парциальные смещения на свободной поверхности пластины $\{u_1, u_2, u_3\} = \{1, 0.36, 0.34\}$, коэффициент электромеханической связи $k^2 = 116 \times 10^{-4}$, частота $\omega = 10^9$ с $^{-1}$ (160 МГц). Из рисунка видно, что с ростом проводимости жидкости σ , нанесенной на одну из поверхностей пластины, скорость акустической моды v вначале стремительно падает, а затем асимптотически приближается к равносному значению. При этом полное изменение скорости тем больше, чем меньше диэлектрическая проводимость жидкости $\epsilon_{ж}$. Так, для LiCl в этаноле ($\epsilon_{ж} = 24.2\epsilon_0$) максимальная $\Delta v/v_0 = 95 \times 10^{-6}$, тогда

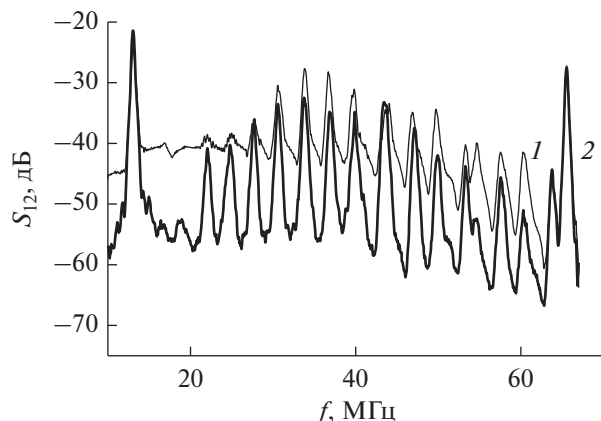


Рис. 3. Спектр нормальных акустических волн пластины $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ с проводящей жидкостью на всем пути распространения, включая зоны над преобразователями (кривая 1), и с той же жидкостью в зазоре между преобразователями (кривая 2).

как для воды ($\epsilon_{\text{ж}} = 79.3\epsilon_0$) она составляет всего 48×10^{-6} .

Также видно, что с ростом проводимости жидкости σ поглощение α акустической моды вначале быстро растет, достигает максимума и затем медленно спадает. При этом максимальная величина поглощения снова тем больше, чем меньше диэлектрическая проницаемость жидкости $\epsilon_{\text{ж}}$, а вид зависимости $\alpha(\sigma)$ несимметричен относительно своего максимума. Этим акустоэлектронное взаимодействие волн Лэмба с проводящей жидкостью отличается от аналогичного взаимодействие поверхностных и объемных волн в пьезополупроводниках, где зависимость $\alpha(\sigma)$ имеет симметричный характер [1].

Вклады в акустические отклики $\Delta v/v_0$ и α от проводимости σ и диэлектрической проницаемости жидкости $\epsilon_{\text{ж}}$ сравнимы друг с другом (рис. 2), а диапазоны значений, для которых σ и $\epsilon_{\text{ж}}$ еще воздействуют на $\Delta v/v_0$ и α , зависят от частоты акустической волны f . Так, для проводимости диапазон воздействия при $f = 160$ МГц находится в пределах $0 < \sigma < 10$ См/м, а при $f = 10$ МГц он сужается, ограничиваясь $0 < \sigma < 1$ См/м.

На рис. 3 представлен типичный спектр нормальных акустических волн, измеренный при разном расположении проводящей жидкости относительно излучающего и приемного ВШП в пластине ниобата лития. Измерения выполнены без электронного подавления наводки, для пластины толщиной $h = 500$ мкм, периода преобразователей $\lambda = 300$ мкм и тестируемой жидкости в виде капли 5%-ного водного раствора NaCl (40 мг) в воде H_2O (200 мг). Как обычно, частоты мод f_n определяются фазовыми скоростями v_n и периодом ВШП (длиной волны λ): $f_n = v_n/\lambda$; амплитуды мод зависят от коэффициентов электромеханической связи K_n^2 и величины поглощения (чем больше K_n^2 и меньше поглощение, тем больше амплитуда волны и меньше ее вносимые потери S_{12}); вид характеристик критически зависит от положения проводящей жидкости на пьезоэлектрической пластине: при нахождении жидкости на всем пути распространения, включая зоны над преобразователями (рис. 1а), электромагнитная наводка (базовый уровень характеристики $S_{12}(f)$ на рис. 3) заметно возрастает, “съедая” часть мод; при нанесении же жидкости только между преобразователями (рис. 1б) положение базового уровня и величина наводки

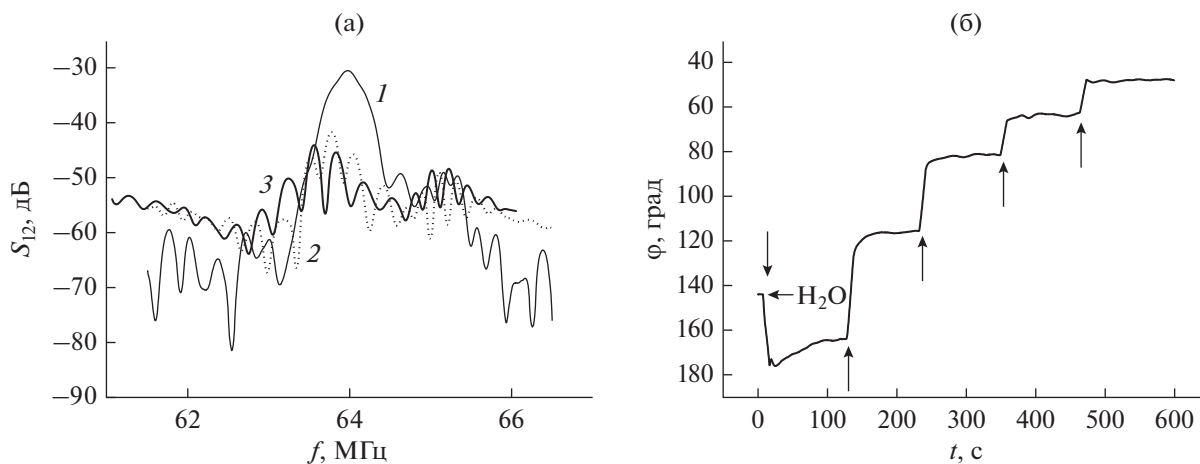


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики одной из мод (а), измеренные без жидкости (1), с водой (2) и с шестью каплями NaCl (240 мг) в воде (200 мг) (3), и фазовый отклик той же моды (б) при последовательном введении в кювету с дистиллированной водой (200 мг) капель 0.9%-ного водного раствора NaCl (40 мг, вертикальные стрелки). Измерение для жидкости на всем пути распространения (см. рис. 1а).

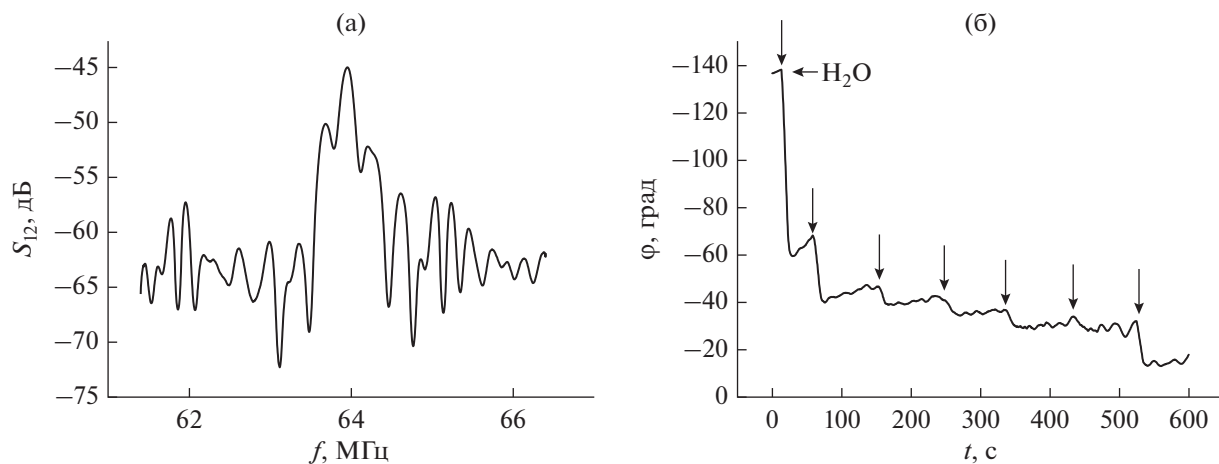


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика той же, что на рис. 4, моды, измеренная для водного раствора с 6-ю каплями NaCl (240 мг) в воде (200 мг) (а), и отклики моды (б) при последовательном введении в кювету с дистиллированной водой (200 мг) каплей 0.9%-ного водного раствора NaCl (40 мг, вертикальные стрелки). Измерение для жидкости в зазоре между преобразователями (рис. 16).

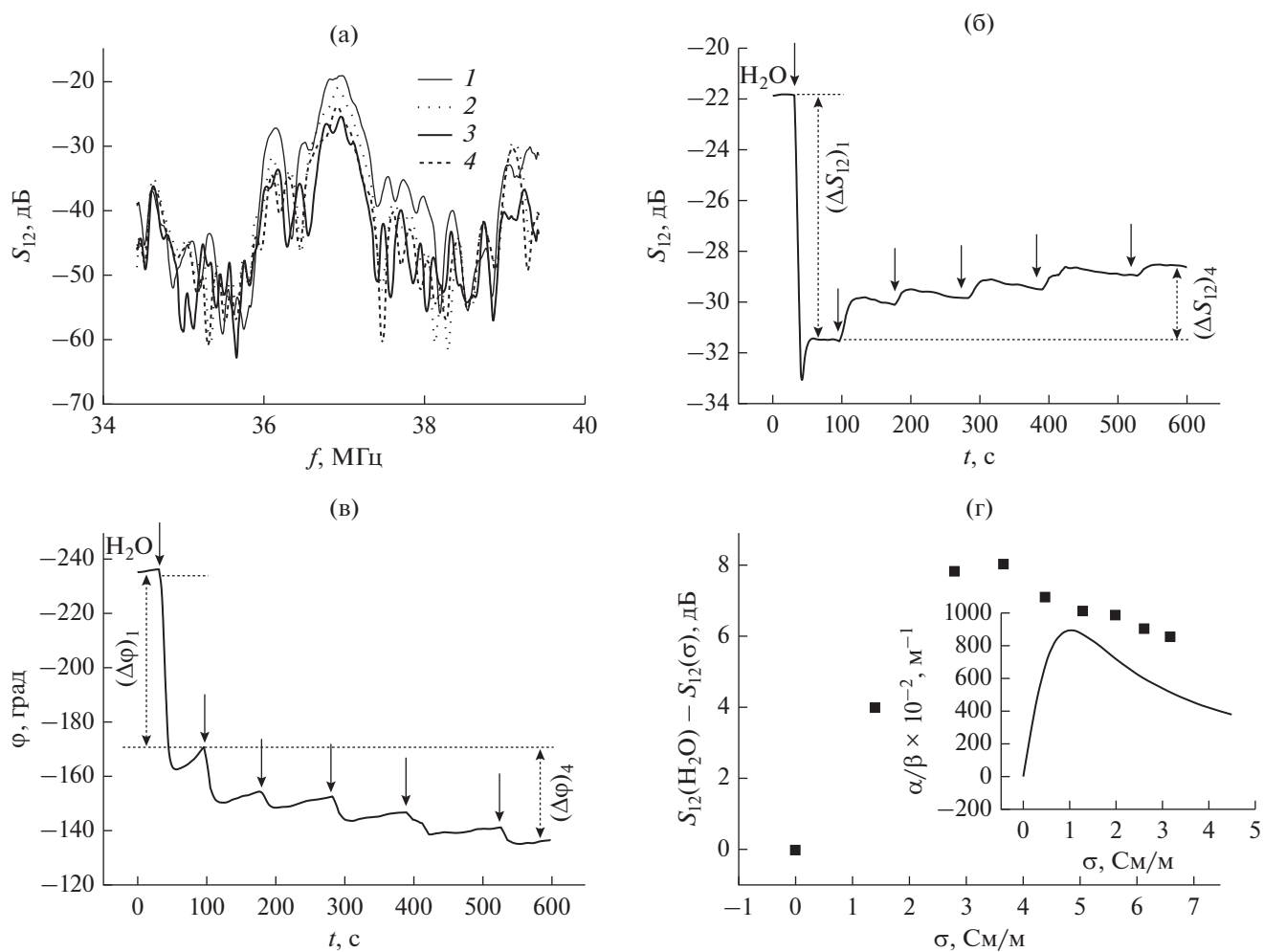


Рис. 6. Характеристики нормальной акустической волны при воздействии различных жидкостных нагрузок: а – АЧХ (1 – на воздухе, 2 – с 200 мг H_2O , 3 – с шестью каплями NaCl (40 мг) в 200 мг воды, 4 – с чистым глицерином), б, в – отклики, г – е – калибровочные кривые; на вставках (г), (д) – рассчитанные зависимости.

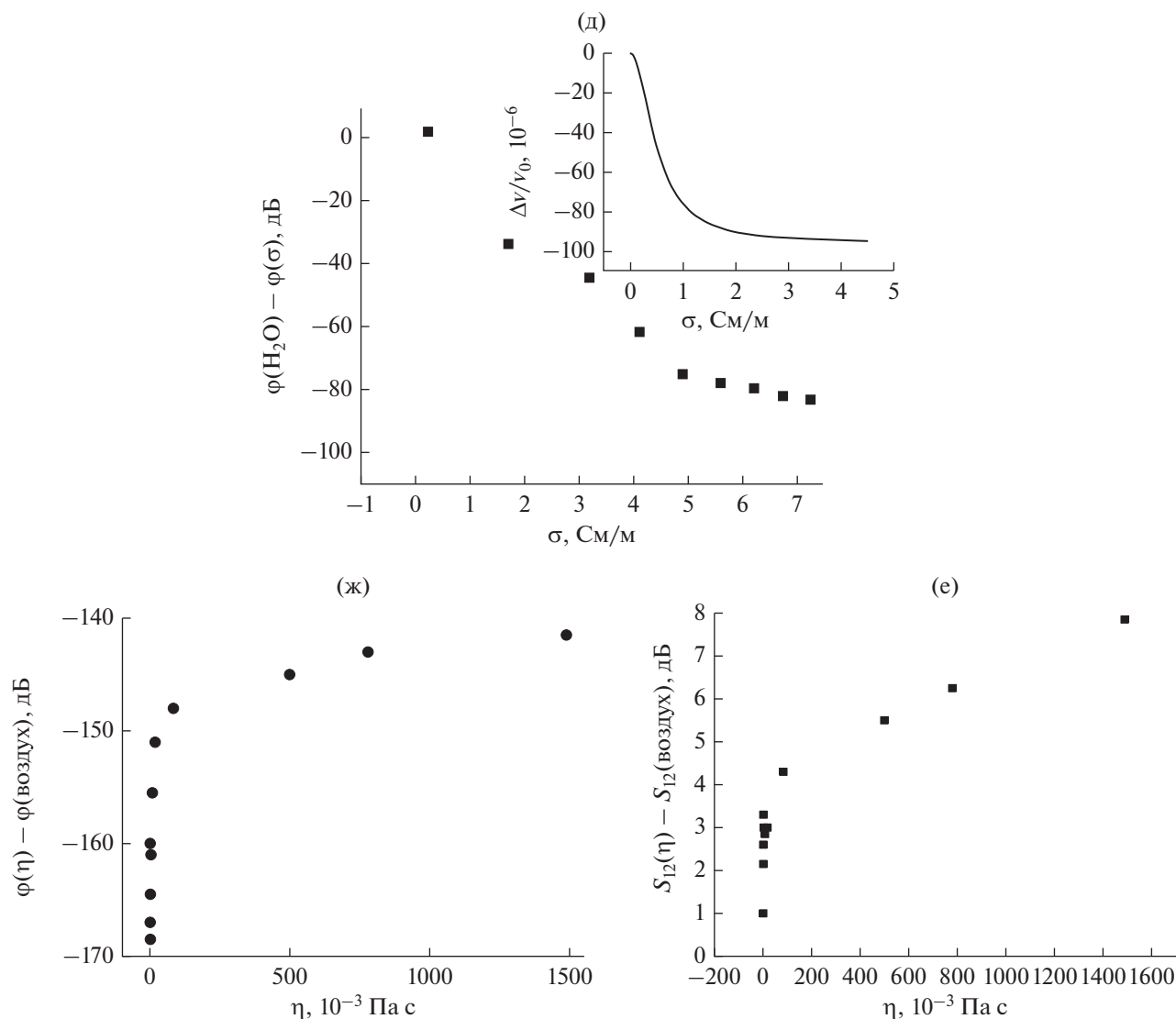


Рис. 6. Окончание

практически не меняются, увеличивая количество детектируемых мод.

Положение жидкости на пластине и уровень электромагнитной наводки сказываются также на величине и знаке фазового отклика нормальных волн (рис. 4 и 5). Так, для пластины $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ толщиной $h = 500$ мкм, периода преобразователей $\lambda = 200$ мкм, частоты моды $f = 63.9$ МГц и жидкости на всем пути распространения (рис. 1а) увеличение проводимости приводит к уменьшению фазы волны φ (рис. 4б) и, следовательно, к ложному увеличению ее скорости v ($\varphi = 2\pi fL/v$, L – расстояние между преобразователями); для жидкости же в зазоре между преобразователями (рис. 1б) то же увеличение проводимости приводит к увеличению фазы φ (рис. 5б) и, следовательно, уменьшению скорости v . Поскольку именно снижению скорости способствует “закорачивание”

пьезоэлектрических полей на поверхности пластин [12], то корректным является именно второе расположение пробы (см. рис. 1б), поэтому оно и использовалось нами в экспериментах (напомним, что сравнение абсолютных значений фазы φ на рис. 4б и 5б не представлялось возможным из-за различия электронных вкладов в полную фазу волны).

Влияние проводимости и вязкости жидкости на характеристики нормальных волн видно из данных, приведенных на рис. 6, где измерения выполнены для пластины 128°YX-LNO толщиной $h = 500$ мкм, преобразователей с периодом $\lambda = 300$ мкм и моды со скоростью $v_0 = 11.34227$ м/с, парциальными смещениями на свободной поверхности $\{u_1, u_2, u_3\} = \{1, 0.25, 1\}$, коэффициентом электромеханической связи $k^2 = 250 \times 10^{-4}$ и

Таблица 1. Нормальные акустические моды пьезоэлектрических пластин с наиболее высокой чувствительностью к электрической проводимости жидкостей

Пластина	h	λ	f , МГц	$(\Delta S_{12})_1$	$(\Delta S_{12})_{4/4}$	$\Delta\varphi_1$	$\Delta\varphi_4/4$
	мкм			дБ		град	
128°YX-LNO	500	300	36.92	9.6	0.6	100	7
64°YX-LNO	500	300	30.4	3.4	0.33	19	5.3
64°YX-LNO	500	300	34.14	4.8	0.6	40	8
64°YX-LNO	500	300	36.64	1.8	0.2	8.5	2.8
64°YX-LNO	500	300	44.7	5.8	0.3	29	8
YZ-LNO	500	300	45.04	8.5	0.4	59	8
YZ-LNO	500	300	36.95	7	1.75	80	4.4
128°YZ + 90°-LNO	500	200	36.55	11	0.6	60	9.5
128°YZ-LNO	500	200	31.18	7	0.8	64	8.5
128°YZ-LNO	350	200	43.4	6	0.23	44	5.5
128°YZ + 30°-LNO	350	200	34.9	6	0.65	59	6.5
41°YX + 30°-LNO	350	200	35.925	10	0.8	67	8.8
41°YX + 30°-LNO	350	200	33.62	15	1.5	150	15
YZ + 30°-LNO	350	200	40.42	9	0.8	40	21.3
YZ + 60°-LNO	350	200	40.24	18	2	102	32
YZ + 90°-LNO	350	200	38.72	4.6	0.6	37	6.1
YZ + 90°-LNO	350	200	52.477	23	1.4	282	14
YZ + 90°-LNO	350	200	58.46	9.6	0.6	300	10
36°YX-LTaO	500	200	62.21	3.4	0.33	32	5
36°YX + 60°-LTaO	500	200	31.19	4.8	0.6	82	7.5
36°YX + 90°-LTaO	500	200	29	1.8	0.2	76	13

Примечание: $(\Delta S_{12})_1$ и $\Delta\varphi_1$ – амплитудный и фазовый отклики акустических мод после введения первой капли раствора NaCl; $(\Delta S_{12})_{4/4}$, $\Delta\varphi_4/4$ – усредненные значения амплитудного и фазового откликов после введения следующих четырех капель того же раствора (см. рис. 6).

частотой $f = 36.926$ МГц. На рис. 6а показана амплитудно-частотная характеристика этой моды для разных жидкостных нагрузок, располагаемых между ВШП. Подавление электромагнитной наводки составляет около 35 дБ, увеличение вносимых потерь из-за нанесения жидкостей не превышает 5 дБ.

Отклики той же волны при последовательном увеличении проводимости жидкостной пробы показаны на рис. 6б и 6в. В начальный момент времени ($0 < t < 20$ с), когда кювета содержит только дистиллированную воду с нулевой проводимостью σ , амплитудная и фазовая характеристики волны не испытывают каких-либо изменений. При добавлении в воду первой же капли раствора NaCl, влекущем за собой увеличение проводимости, наблюдается резкое изменение как вносимых потерь S_{12} , так и фазы волны φ (10 с $< t < 100$ с). Последующие увеличения проводимости ($t > 100$ с) уменьшают значение S_{12} (увеличивают амплитуду волны) и увеличивают значение φ (уменьшают ее скорость v). В результате зависимость $v(\sigma)$ имеет вид

обычной экспоненциально убывающей функции (рис. 6д), характерной для акустоэлектронного взаимодействия, а зависимость $S_{12}(\sigma)$ является необычной (рис. 6г) – она асимметрична относительно максимума в отличие от таковой для поверхностных и объемных акустических волн в пьезоэлектрических полупроводниках [1]. При этом вид экспериментальных зависимостей $v(\sigma)$ и $S_{12}(\sigma)$ качественно совпадает с рассчитанными для той же моды по формулам (1), (2) (см. вставки на рис. 6г, 6д).

В настоящий момент физическая причина асимметрии кривой поглощения $S_{12}(\sigma)$ для нормальных акустических волн неясна. Она требует отдельного исследования с учетом реальных изменений профилей упругих смещений и электрического потенциала конкретной моды при постепенном изменении электрических условий на поверхности пьезоэлектрической пластины [9].

Перекрестная чувствительность той же нормальной волны к вязкости и проводимости жидкости видна из сравнения соответствующих калибрацион-

ных кривых на рис. 6г–6е: максимальные значения $\Delta S_{12}(\sigma)$ и $\Delta S_{12}(\eta)$ близки друг другу и составляют 8 и 7.5 дБ соответственно; максимальные значения $\Delta\phi(\sigma)$ и $\Delta\phi(\eta)$ отличаются между собой и составляют 100° и 35° соответственно.

Приведенные на рис. 6 особенности электрической чувствительности нормальных волн присущи всем модам и пластинам, исследованным в данной работе. В табл. 1 приведены наиболее интересные из них. Как и прежде, пригодность мод к электрическим измерениям оценивалась исходя из следующих критериев:

а) уровня электромагнитной наводки относительно акустического сигнала в присутствии проводящей жидкости (подавление не менее 10 дБ),

б) формы амплитудно-частотной характеристики и величины вносимых потерь S_{12} при действии проводящей жидкости с $\sigma \sim 1$ См/м,

в) отсутствия интерференции исследуемой волны с соседними модами с близкими скоростями и частотами,

г) чувствительности волны к проводимости жидкости,

д) возможности одновременного измерения как амплитудного ΔS_{12} , так и фазового $\Delta\phi$ откликов.

Учитывалось, что ввиду своей функциональной зависимости фазовый отклик при соответствующей калибровке позволяет однозначно определять значение проводимости тестируемой жидкости, а амплитудный — имеет одинаковую величину для двух значений проводимости, поэтому одно из них должно быть исключено дополнительным измерением, например, с использованием второй акустической моды. По спаду и росту $\Delta\phi$ и ΔS_{12} можно судить об увеличении или уменьшении проводимости начального раствора.

Данные табл. 1 можно резюмировать следующим образом. Все волны, привлекательные для электрических измерений жидкостей, относятся к модам высоких порядков. Среди них существуют моды с большой чувствительностью по амплитуде и малой по фазе, с большой чувствительностью по фазе и малой по амплитуде, с большой чувствительностью и по амплитуде, и по фазе. Некоторые моды, по нашему мнению, являются наиболее привлекательными по совокупности параметров (в табл. 1 выделены жирным). Так, мода с частотой 58.46 МГц, распространяющаяся в пластине $YZ + 90^\circ$ -LNO ($h = 350$ мкм, $\lambda = 200$ мкм), обладает наибольшими значениями всех четырех параметров, $(\Delta S_{12})_1$, $\Delta\phi_1$, $\Delta S_{12}/4$, $\Delta\phi/4$, характеризующими чувствительность моды к проводимости жидкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, акустоэлектронное взаимодействие нормальных акустических волн с носителями заряда проводящей жидкости, которая находится в контакте с одной из поверхностей пьезоэлектрической пластины, отличается от такового для поверхностных и объемных акустических волн в однородных пьезоэлектрических полупроводниках — зависимость акустоэлектронного поглощения от проводимости несимметрична относительно своего максимума. Причиной этих отличий может служить неоднородность среды распространения и более сложная структура волн нормального типа по толщине пластины. Данное предположение требует дополнительных исследований.

При измерении электрических характеристик жидкостей с помощью нормальных акустических волн предпочтительным является размещение тестируемой пробы в зазоре между преобразователями, снижающее электромагнитную наводку, и измерение фазы волны как обеспечивающее однозначное определение проводимости. Однако фазовый отклик сильно зависит от температуры и требует ее постоянства в процессе измерений; он также неприменим к неравновесным процессам, сопровождаемым выделением или поглощением тепла. Напротив, амплитудный отклик нормальных волн почти не зависит от температуры и может быть применен к неравновесным процессам, но он имеет одинаковую величину для двух значений проводимости, поэтому одно из них должно быть исключено дополнительным измерением, например, с использованием второй акустической моды.

Селективное измерение проводимости жидкости нормальными акустическими волнами затруднено из-за перекрестной чувствительности волн к диэлектрическим свойствам ϵ_j и вязкости жидкости. Тем не менее при известных и/или слабо меняющихся ϵ_j и η проводимость может быть селективно измерена в диапазоне 0...10 См/м. Чувствительность нормальных волн достигает 0.4 дБ/(См/м) по амплитуде и 4.4° /(См/м) по фазе. Требуемый объем пробы составляет не более 200...500 мкл.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев Ю.В., Хикернелл Ф.С. // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 1. С. 101.

2. *Martin S.J., Ricco A.J., Niemczyk T.M., Frye G.C.* // *Sensors and Actuators*. 1989. V. 20. № 3. P. 253. [https://doi.org/10.1016/0250-6874\(89\)80124-6](https://doi.org/10.1016/0250-6874(89)80124-6)
3. *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G., Borodina I.A.* // *IEEE Trans.* 2001. V. UFFC-48. № 2. P. 627. <https://doi.org/10.1109/58.911748>
4. *Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Джоши С.Г.* // *ЖТФ*. 2001. Т. 71. № 6. С. 127.
5. *Oyama T., Kondoh T.O., Shiokawa S.* // *Proc. IEEE 2004 Int. Frequency Control Symp. Montreal. 23–27 Aug. N.Y.: IEEE, 2004. P. 235.* <https://doi.org/10.1109/FREQ.2004.1418459>.
6. *Anisimkin V.I., Kuznetsova I.E., Kolesov V.V. et al.* // *Ultrasonics*. 2015. V. 62. № 9. P. 156. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.05.012>
7. *Анисимкин В.И., Покусавев Б.Г., Складнев Д.А. и др.* // *Акуст. журн.* 2016. Т. 62. № 6. 738. <https://doi.org/10.7868/S0320791916060010>
8. *Kondoh J., Nakayama K., Kuznetsova I.* // *Sensors and Actuators A: Phys.* 2021. V. A325. Article № 112503. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112503>
9. *Анисимкин В.И., Воронова Н.В., Галанов Г.Н.* // *РЭ*. 2010. Т. 55. № 9. С. 1121.
10. *Анисимкин В.И., Кузнецова И.Е.* // *РЭ*. 2019. Т. 64. № 8. С. 831.
11. *Chemical Rubber Company Handbook of Chemistry and Physics. 67th ed. / Ed. R.C. Weast, M.J. Astle, W.H. Beyer. Boca Raton: CRC Press, 1986. P. D254.*
12. *Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е.* *Акустические волны в тонких пьезоэлектрических пластинах.* М.: Радиотехника, 2018.
13. *Tiersten H.F., Sinha V.K.* // *J. Appl. Phys.* 1978. V. 49. № 1. P. 87. <https://doi.org/10.1063/1.324340>