

Электрический отклик в волне второго звука: аппаратурный аспект

А.С. Рыбалко

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
пр. Науки, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: rybalko@ilt.kharkov.ua*

Т.В. Чаговец

Institute of Physics ASCR — Na Slovance 2 182 21, Prague, Czech Republic

А.М. Королев

Радиоастрономический институт НАН Украины, ул. Искусств, 4, г. Харьков, 61002, Украина

Статья поступила в редакцию 12 июля 2016 г., после переработки 26 октября 2016 г.,
опубликована онлайн 25 апреля 2017 г.

Представлено развернутое описание стандартных методик измерения и оригинальных технических решений, использованных авторами при исследованиях обнаруженного недавно явления электрического отклика в волне второго звука. Приведены наиболее удачные схемы усилителей, используемых для прецизионных низкотемпературных измерений, а также анализ чувствительности различных измерительных систем. Основная цель работы — обоснование достоверности эффекта электрической активности, возникающей в резонаторе с He II при возбуждении волны второго звука. Показано, что наблюдаемый сигнал электрического отклика не связан с внешними помехами или внутренними наводками, а также не является результатом ни прямого акустоэлектрического преобразования, ни термоконтактных потенциалов. Приведен также анализ и сравнение новых экспериментальных данных, полученных в двух научных группах.

Подано розгорнутий опис стандартних методик вимірювання та оригінальних технічних рішень, які використані авторами при дослідженнях виявленого нещодавно явища електричного відгуку в хвилі другого звуку. Наведено найбільш вдалі схеми підсилювачів, які використовують для прецизійних низкотемпературних вимірювань, а також аналіз чутливості різних вимірювальних систем. Основна мета роботи — обґрунтування достовірності ефекту електричної активності, що виникає в резонаторі з He II при порушенні хвилі другого звуку. Показано, що спостережуваний сигнал електричного відгуку не пов'язаний із зовнішніми перешкодами або внутрішніми наведеннями, а також не є результатом ні прямого акустоелектричного перетворення, ні термоконтактних потенціалів. Наведено також аналіз і порівняння нових експериментальних даних, отриманих в двох наукових групах.

PACS: 84.30.Le Усилители;
67.25.dw Сверхтекучесть в малых кластерах.

Ключевые слова: второй звук, электрический отклик, прецизионные низкотемпературные измерения.

1. Введение

Второй звук в сверхтекучем гелии, предсказанный Ландау в 1941 г. [1] и впервые обнаруженный Пешковым в 1946 г. [2], представляет собой слаботухающие колебания температуры и энтропии. С тех пор иссле-

дования второго звука стали неотъемлемой частью изучения свойств явления сверхтекучести.

Традиционно волны второго звука в сверхтекучем гелии возбуждают, пропуская переменный ток через малоинерционный плоский нагреватель, расположенный на торце резонатора. Второй звук возникает на

удвоенной частоте, так как нагреватель дважды излучает тепловую волну в He II в течение периода. Регистрируют звук малоинерционным пленочным термометром сопротивления (болометром), расположенным на втором торце резонатора. В 2004 г. в работе [3] при исследованиях сверхтекучего гелия с помощью второго звука болومتر был заменен электростатическим зондом. По результатам исследований было сообщено о регистрации электрических потенциалов, которые по частоте совпадали с частотой второго звука и также носили резонансный характер [3]. Сигналы не наблюдались при температурах выше λ -точки, когда сверхтекучий гелий переходил в нормальное состояние. Отсутствовали они и при возбуждении первого звука, когда нормальная и сверхтекучая компоненты колеблются синфазно. В 2014 г. электрические резонансы в волне второго звука были зарегистрированы в [4,5]. В этих работах было также обнаружено, что при увеличении интенсивности возбуждения до некоторого критического значения электрический отклик исчезает.

Для объяснения полученных результатов было предложено около десяти феноменологических моделей [6–27], в которых качественно рассматривается динамическая поляризация He II при наличии относительного движения нормальной и сверхтекучей компонент. Тем не менее, несмотря на большое количество теоретических исследований, природа возникновения «электрического отклика» в волне второго звука по-прежнему остается невыясненной.

Отсутствие целостной количественной теории, с одной стороны, техническая сложность измерения малых сигналов ($\ll 1$ мкВ) от источников с высоким внутренним сопротивлением, с другой стороны, вызвали определенный скептицизм в отношении достоверности наблюдаемого в [3] электрического резонансного отклика. Сыграли роль также и некоторые неточности, сопутствовавшие представлению экспериментальных результатов: 1) при описании последовательности операций по смене источников звука, а также болометров и зондов, была допущена путаница, затруднявшая понимание результатов экспериментов; 2) на рис. 1(а) [3] масштаб по оси ординат был ошибочно занижен на порядок. Кроме того, в самой статье отсутствовало четкое описание измерительной схемы. Работа [28] подтвердила наличие электрического отклика, сопровождающего волну второго звука, но по-прежнему не были рассмотрены возможные помехи, которые могли быть источником ложных сигналов. Поэтому эксперименты, начатые в работах [3–5,28], были продолжены в совместном украинско-чешском проекте с использованием разных усилительных систем: криогенного устройства прямого усиления и трансимпедансного усилителя с

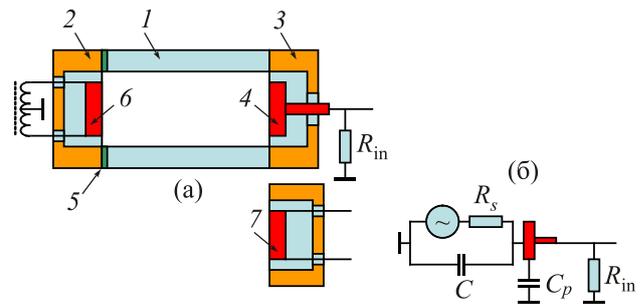


Рис. 1. (а) Типичная конструкция резонатора второго звука: 1 — цилиндр из пластика; 2 — крышка с излучателем второго звука; 3 — сменная крышка-отражатель; 4 — электростатический зонд; 5 — щель заполнения жидкостью резонатора; 6 — нагреватель; 7 — болومتر для регистрации колебаний температуры; (б) эквивалентная схема: R_s — внутреннее сопротивление источника наблюдаемых электрических сигналов, R_{in} — входное сопротивление усилителя, $C \sim 10^{-15}$ пФ — емкость нагреватель-зонд, C_p — емкость зонд-земля.

компенсацией входной емкости (харьковская группа). Пражская группа проводила аналогичные измерения стандартным Lock-in SR-830 и предусилителем SR-560 при дифференциальном подключении зондов [4,5].

Настоящая работа представляет собой развернутое описание оригинальных методик измерения, оригинальных технических решений и сравнение их со стандартными методиками, используемыми авторами двух групп при исследованиях нового необычного явления. Основная цель работы — обоснование достоверности связи наблюдаемого электрического отклика с волной второго звука. Фундаментальный характер обнаруженного явления обуславливает несомненную актуальность верификации наблюдаемого эффекта. Работа содержит аргументы в пользу того, что сопровождающий второй звук электрический отклик не является результатом ни прямого акустоэлектрического преобразования, ни термоконтактных потенциалов. Вопросы интерпретации электрической активности He II освещаются на минимальном уровне.

Авторы также надеются, что излагаемый ниже материал будет полезен широкому кругу исследователей-практиков, занятых в области прецизионного физического эксперимента при низких температурах.

2. Измерительные устройства

Особенность используемых в работах измерительных ячеек заключалась в совмещении резонатора второго звука и системы электростатических зондов. В обеих исследовательских группах резонаторы (рис. 1) представляли собой толстостенные цилиндры из пла-

* Электрический отклик — название, которое, возможно, в будущем будет изменено.

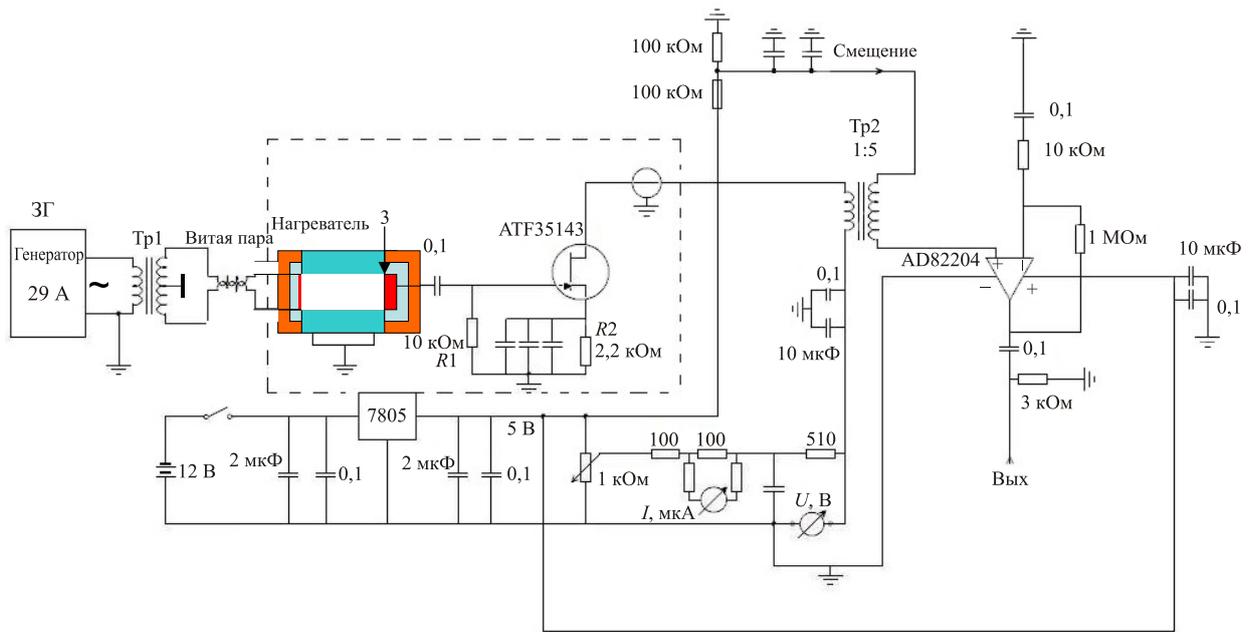


Рис. 2. Принципиальная схема измерительной системы прямого усиления с охлаждаемым предусилителем.

стика l длиной ~ 25 мм, закрытые параллельными торцевыми отражателями второго звука — крышками 2, 3. Диаметры цилиндров составляли 4,9 мм (харьковская группа) и 7 мм (пражская группа). Резонаторы погружались в жидкость и заполнялись относительно быстро через обе щели крышка–цилиндр (пражская группа). Ячейка харьковской группы была отделена сверхщелью 5, находящейся со стороны источника звука, и заполнялась гелием за 20–40 мин.*

На одной из крышек располагались излучатели второго звука 6, фиксируемые эпоксидной смолой. Для возбуждения волн второго звука использовались малоинерционный RuO_2 нагреватель (харьковская группа) или бифилярно намотанный проволочный нагреватель (пражская группа). Питались излучатели второго звука по витой паре от генераторов через симметрирующий трансформатор Tr1 со средней точкой (см. рис. 2). На рис. 1 показана только вторичная обмотка Tr1 . В крышках 3 располагались приемники второго звука, фиксируемые эпоксидной смолой: датчик электрического сигнала (зонд) 4, либо датчик колебаний температуры 7. Датчиками колебаний температуры служили болометры: малоинерционный термометр RuO_2 (харьковская группа) и полупроводниковый болометр [29] (пражская группа). Конструктивно датчики (зонды) вариаций электростатического поля представляли собой полированные металлические диски, хорошо отражающие колебания второго звука. Амплитуды колебания температуры и колебаний электрических потенциалов изме-

рялись отдельно при смене крышек 3. Более подробные сведения о резонаторах можно найти в работах [5,6,28]. В следующем разделе рассмотрим методику измерений и усилители.

3. Методика наблюдений электрической активности

3.1. Способы регистрации поляризации

Возникновение электрической поляризации вещества приводит к появлению связанных зарядов на зонде. Локальная быстропеременная поляризация диэлектрика, в отсутствие токов проводимости, фиксируется измерением тока, либо разности потенциалов. Следовательно, в зависимости от соотношения сопротивлений R_s , $1/\omega C_p$ и R_{in} методы измерений можно условно разделить на две группы: 1) «токовые»; 2) «потенциальные» (см. рис. 1). Для переменных сигналов с фиксированными амплитудами, для «токового» и «потенциального» методов, справедливы, соответственно, следующие соотношения:

$$q_{0i} = (2\pi f)^{-1} i_0, \quad (1)$$

$$q_{0u} = C_p u_0, \quad (2)$$

где i_0 — измеряемый ток через сопротивление R_{in} , соединяющее зонд с землей, u_0 — измеряемое напряжение на емкости зонда C_p , f — частота. Реализация каждого из названных методов требует выполнения определенных требований к электронике.

* Уже при первых исследованиях второго звука было установлено, что место расположения и размер канала заполнения резонатора жидкостью сильно влияли на амплитуду и добротность резонансов из-за тепловых потерь. Длительное заполнение жидкостью свидетельствовало о слабой тепловой связи резонатора с ванной через щель заполнения.

3.2. Измерительная система с охлаждаемым предварительным усилителем

Принципиальная схема первого варианта измерительной системы прямого усиления показаны на рис. 2. Она состоит из расположенного возле резонатора предварительного усилителя (каскад на Q1) и маломощного линейного усилителя (MC1, коэффициент усиления 40 дБ, полоса рабочих частот 160–10000 Гц). Достоинство схемы с охлаждаемым предусилителем заключается в отсутствии кабеля зонд-усилитель и, соответственно, шунтирующей зонд емкости. Обычная величина шунтирующей емкости — порядка 100 пФ на метр длины кабеля, т.е. на два порядка больше емкости зонда. В данном случае элементы предусилителя смонтированы в непосредственной близости от зонда и шунтирование несущественно.

Трансформаторная связь (Tr2, 1:5) обеспечивает оптимальное согласование импедансов каскадов при минимальных вносимых тепловых шумах. Сигнал с усилителя подается либо на синхронный детектор, либо на FFT анализатор спектра.

Полевой транзистор, использованный в предусилителе, относится к классу гетероструктурных псевдоморфных (PHEMT), у которых активация электронов токопереноса осуществляется не термически, а встроенным полем гетероперехода. Как следствие, этот класс транзисторов не имеет низкотемпературного порога деградации характеристик и принципиально работоспособен вплоть до нулевой абсолютной температуры. Более того, рост подвижности электронов проводимости при охлаждении приводит к улучшению базовых электрических характеристик PHEMT — частотных, усилительных, высокочастотных шумовых. Эта тематика подробно отражена в литературе (см., например, [30]). В то же время, применение HEMT на звуковых частотах ограничено вследствие больших шумов со спектром типа $1/f$. Используя нестандартные режимы (микроточковый, ненасыщенный), можно сдвинуть границу проявления низкочастотных шумов с десятков мегагерц (стандартный режим) до сотен килогерц, но на более низких частотах вопрос о шумах HEMT при $T \sim 4,2$ К оставался открытым. Поэтому перед использованием HEMT было проведено измерение его шумовых характеристик на разных режимах в области низких (звуковых) частот.

Стандартное шумовое тестирование на низких и радиочастотах предполагает отдельное измерение спектра шумов тока и напряжения, приведенных к входу транзистора. По результатам можно вычислить базовые шумовые параметры транзистора — минимальную эквивалентную шумовую температуру (шум-фактор), оптимальный импеданс источника, шумовую проводимость и др. [30]. В нашем случае эта громоздкая процедура неэффективна, так как импеданс источника (зон-

да) определяется общей задачей и не оптимизируем. По сути, можно только оптимизировать режим транзистора по постоянному току и величину резистора (R_1) в цепи затвора. Такая оптимизация выполнялась в два этапа. Первый — выбор величины R_1 . Для максимизации зарядовой чувствительности R_1 следует увеличивать (см. ниже, выражение (4)). Верхний предел R_1 определяется реактансом зонда и в нашем случае составляет около 100 МОм. Однако наличие токов утечки затвора транзистора и связанного с ними дополнительного источника шума ограничивает величину R_1 заметно меньшими значениями. Опытным путем для маломощных PHEMT AVAGO оптимальная величина сопротивления R_1 установлена, и оказалась близкой к 10 МОм. Точное значение зависит от типа и экземпляра транзистора, но такое уточнение уже малоэффективно.

Второй этап — выбор оптимальных параметров тока стока I_s регулировкой резистора автосмещения и напряжения сток-исток. Критерий — минимизация граничной частоты проявления шумов типа $1/f$ (т.н., corner frequency) при сохранении приемлемого (более 1) коэффициента усиления по напряжению каскада (без учета трансформатора). Для найденного оптимального режима (температура 1,3...2 К) сопротивление смещения $R_2 = 2,2$ кОм, ток стока транзистора ATF35143 ~ 1 мА), граничная частота $1/f$ -шума близка к 2 КГц, а при ~ 100 мкА (напряжение сток-исток 0,7–1 В) — 400 Гц (рис. 3). Транзистор ATF35143 был выбран как имеющий меньшие шумы при $T \sim 2$ К. Таким образом, как показано, выбором оптимальных параметров транзистора можно снизить граничную частоту проявления шумов типа $1/f$.

Сделаем оценку предельной чувствительности показанной на рис. 3 измерительной системы, полагая единственным ограничителем чувствительности теп-

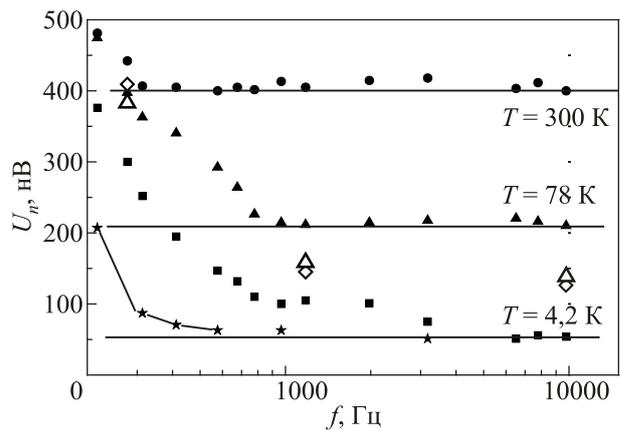


Рис. 3. Спектр шумов трех типов транзисторов. Черные символы — ATF35143, открытые треугольники — ATF36077, открытые ромбы — ATF3100S02. Звездочки — $I_s = 100$ мкА, остальные точки — $I_s = 1$ мА. Горизонтальными линиями показано значения шумов Найквиста сопротивления 10 МОм при разных температурах в полосе 1 Гц.

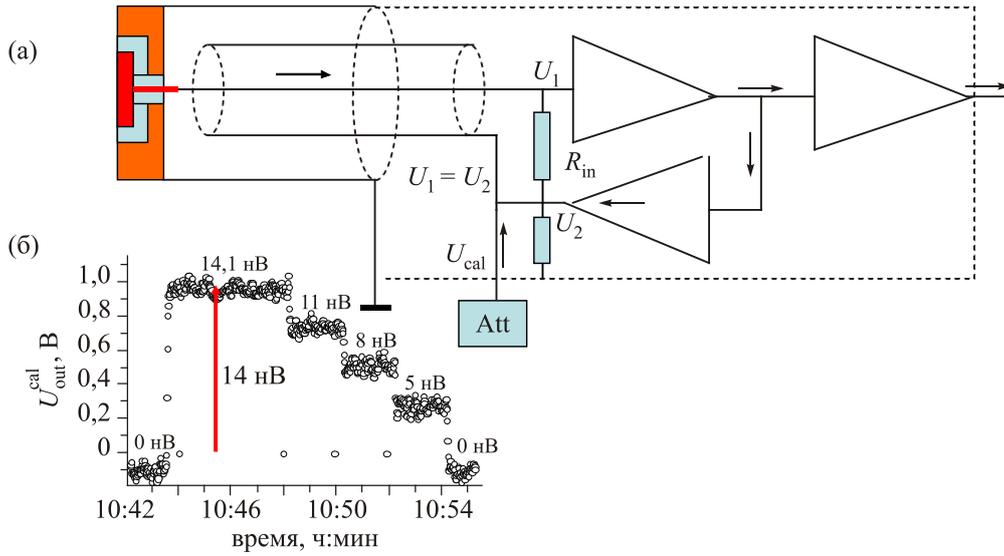


Рис. 4. Блок-схема трансимпедансного усилителя и его входной цепи (а); запись от времени напряжения на выходе синхродетектора в полосе 1 Гц при подаче калибровочного напряжения 14 нВ с аттенюатора с последующим ступенчатым снижением $\sim 3,5$ нВ (б). На нагревателе $U_h = 0$, на опорное плечо Lock-in подается напряжение с калибровочного генератора.

ловые шумы резистора R_1 . В соответствии с формулой Найквиста для среднего квадрата шумового тока (I_n) в цепи резистора с сопротивлением R_1 имеем:

$$\langle I_n^2 \rangle = 4kT\Delta f / R_1, \text{ или } I_n = (4kT\Delta f / R_1)^{0,5}, \quad (3)$$

где T — температура резистора (здесь — температура гелиевой ванны), Δf — эффективная полоса пропускания синхронного детектора, k — постоянная Больцмана. Введем критерий предельной чувствительности (отношение сигнал/шум): $i_0 = \sqrt{2}I_n$. Тогда для минимального регистрируемого заряда (q_{\min}) получаем:

$$q_{\min} = (4kT\Delta f / R_1)^{0,5} / 2\pi f = (kT\Delta f / R_1)^{0,5} / \pi f. \quad (4)$$

Для получения ориентировочного численного значения q_{\min} положим $T=2$ К, $\Delta f=1$ Гц, $R_1=10^7$ Ом, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Тогда $q_{\min}=0,5 \cdot 10^{-18}$ Кл.

Реальное значение чувствительности q_{\min} было определено прямым измерением. К входу зонда через калиброванную емкость $C_{\text{cal}}=42$ пФ подавалось калиброванное напряжение $U_{\text{cal}}=200$ нВ в частотном диапазоне 200–2000 Гц. Электрический ток в цепи изменялся в пределах $0,93\text{--}2 \cdot 10^{-14}$ А при изменении частоты. Чувствительность к заряду определялась согласно выбранному отношению сигнал/шум 2. Согласно данным о ширине шумовой дорожки (см. рис. 6) и указанным выше значениям калибровочного тока, при площади зонда $0,2$ см² чувствительность к поляризационному заряду составила $\sim 2 \cdot 10^{-17}\text{--}2 \cdot 10^{-18}$ Кл/см².

3.3. Усилитель с компенсацией шунтирующей емкости

Для реализации метода измерения потенциала зонда был сконструирован специальный усилитель. Этот вариант измерительной системы (рис. 5) основан на т.н. «усилителе заряда» с компенсацией шунтирующей емкости [31]. В отличие от известной схемы [31] в нашем случае компенсирующий сигнал обратной связи подводится не к отдельному компенсирующему электроду и не непосредственно к входу усилителя (как в известной трансимпедансной схеме), а к промежуточной оплетке кабеля, соединяющего датчик и усилитель (в данном случае — находящийся вне криостата)*.

Величина обратной связи подобрана так, что обкладки конденсатора «центральный проводник–промежуточный экран» имеют сравнимый потенциал, т.е. эта емкость не заряжается и ток через входное сопротивление от источника индуцированных зарядов не протекает. Усилитель, построенный по такой схеме, практически не нагружает источник сигнала, так как имеет большое (виртуальное) входное сопротивление за счет обратной связи. Реальное значение $R_{\text{in}} \sim 1$ кОм, т.е. имеет малые значения шумов. Чувствительность системы ограничивалась шумами входного сопротивления и входного транзистора 2N4393. Зарядовая чувствительность, по результатам тестирования составила $\sim 5 \cdot 10^{-20}$ Кл/см² при отношении «сигнал–шум» не хуже 10 дБ, т.е. заметно выше, чем в первом варианте измерительной системы. Это объясняется существенно более низкими шумами типа $1/f$ транзистора первого

* Мы благодарим Семенова С.Ф. за изготовление нескольких вариантов усилителей.

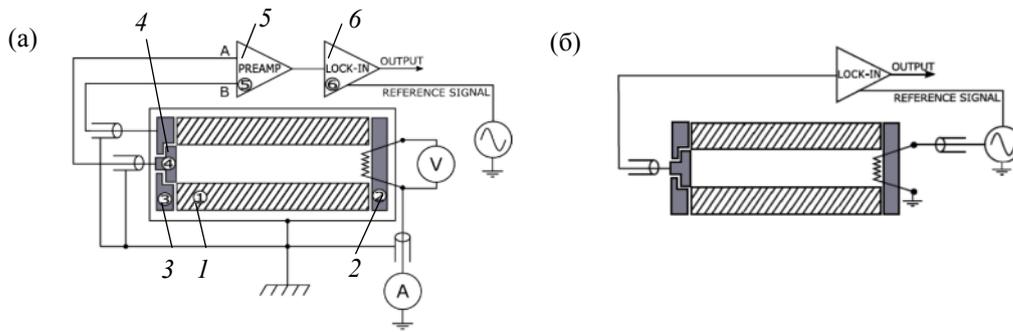


Рис. 5. Схема измерений сигналов электрической активности с дифференциальным подключением электрода (а): тело резонатора (1); крышка с нагревателем (2); держатель электрода (3) с вклеенным электродом (4); низкошумящий предусилитель (SR 560) (5); фазовый детектор (SR 830) (6). Схема прямого подключения электрода (б).

каскада (отобранный из партии КП103, а также 2N4393, NPD5544).

3.4. Дифференциальная измерительная система

Опыты, описанные в [4,5], проводились с использованием фазочувствительного усилителя с дифференциальным входом SR-830 Lock-in, имеющего входное сопротивление 10 МОм и входную емкость 25 пФ (см. рис. 5). Lock-in измерял разность потенциалов между внутренним проводником коаксиального кабеля, подключенного к измерительному электроду (вход А), и оплеткой. Для некоторых измерений был использован предусилитель с дифференциальным входом (SR-560 from Stanford Research Systems, 100 МОм и входной емкостью 25 пФ). Вход А был подключен к зонду, а вход В к держателю электрода. Использование предусилителя с полосой пропускания $\Delta f \sim 1000$ Гц помогало снизить шум, связанный с механическими вибрациями.

Такой метод измерения электрического отклика делал измерительную схему простой и исключал прямую связь между излучателем и приемником, а использование коммерческих приборов позволяло исключить калибровку и паспортизацию самодельных усилителей.

Входные цепи SR-830 и SR-560 сконструированы также по принципу трансимпедансных усилителей. Отличие только в том, что используется виртуальный ноль входной цепи, исключающий необходимость двойной экранировки входного кабеля. Ниже мы рассмотрим возможные источники ложных сигналов.

4. Возможные источники помех и ошибочных сигналов

4.1. Внешние помехи и внутриаппаратурные наводки

Все помехи по происхождению можно разделить на два типа: внешние (индустриальные и др.) и внутренние, генерируемые в самой измерительной аппаратуре.

Техника подавления внешних помех хорошо известна — многослойная электрическая и магнитная экранировка, заземление, гальванические «развязки» и т.п. С этой точки зрения, конструкция экспериментальных установок вполне адекватна кругу решаемых задач. Тесты показали, что в интересующей полосе частот средний уровень эфирных помех и наводок заведомо ниже собственных шумов измерительных усилителей. Отдельные мощные выбросы промышленных наводок видны на записях (см. рис. 6), расположены вне диапазона проявления полезного сигнала, наблюдаются в диапазоне температур 1,3–300 К и не смещаются с температурой.

Сразу заметим, что исходя из параметров эквивалентной схемы рис. 1 ($C \sim 10^{-15}$ пФ, $R_{in} \sim 10^7$ Ом) оценки паразитного нерезонансного сигнала электростатической наводки возбуждатель–зонд на основной частоте должны быть 1–10 мкВ. Чтобы еще снизить величину этой наводки, мы применили симметричное питание источника звука через Tr1. Специально введя в схему возбуждения декомпенсацию, сигнал наводки на первой гармонике можно было искусственно увеличить и визуализировать. При величине возбуждающего напряжения 1 В (близко к практике) было показано, что величина наводки на зонде не превышает 0,1 мкВ при 10% декомпенсации. Измерение синхронной системой на удвоенной частоте еще подавляло сигнал наводки приблизительно на 40 дБ. Наводки подобного типа имеют нерезонансный характер и выглядят как смещение нуля.

Трансформатор Tr1 играл также роль гальванической развязки для предотвращения токовых наводок по общим цепям заземления генератора и приемного узла.

Принципиально нельзя исключить наводку на второй гармонике генератора, совпадающей по частоте с полезным сигналом. Однако с учетом низкого коэффициента гармоник использованного звукового генератора (не более –40 дБ), ожидать заметной помехи такого рода не приходится.

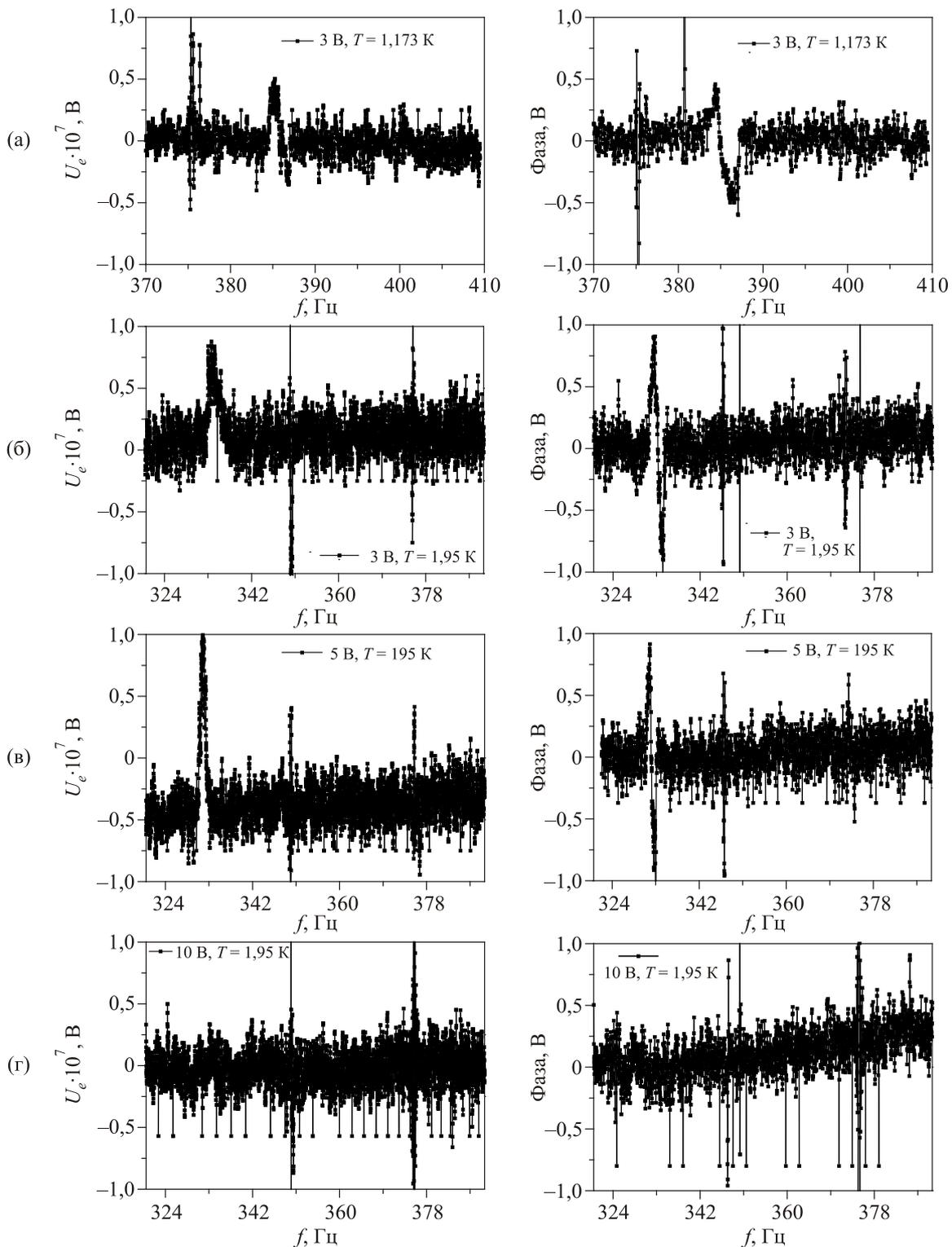


Рис. 6. АЧХ электрических резонансов при разных условиях, измеренные при помощи усилителя с криогенным предусилителем в полосе 1 Гц. Кроме резонансов, которые движутся с изменением температуры, видны биения при сложении сканирующей частоты и промышленной наводки на частотах 350 и 375 Гц.

4.2. Отклик за счет принципиально возможных каналов преобразования звук–электрический сигнал

Очень серьезным аргументом, подтверждающим природу электрической активности в объекте, является ее жесткая привязка к температуре λ -точки. Единст-

венный, по мнению авторов, механизм такой «привязки» — второй звук. Поэтому необходимо принять меры, чтобы регистратор (система зонд–усилитель) не детектировал звук как колебания давления и плотности среды, т.е. зонд не выполнял функций микрофона. Например, при наличии на зонде постоянного потенциала

зонд может вырабатывать синхронный звуку сигнал двумя путями. Первый: вибрация зонда в поле давления, что приводит к модуляции емкости и возникновению переменного потенциала. Это принцип действия известных в звукотехнике электростатических и электретных микрофонов. Второй путь: модуляция плотности среды вторым звуком в меру коэффициента теплового расширения (этот вид модуляции намного меньше, чем в волне первого звука, где отклик не наблюдался [3]), что вызывает модуляцию диэлектрической проницаемости, а значит, модуляцию емкости и возникновение переменного потенциала зонда. В целях проверки действия таких механизмов на зонд подавался постоянный потенциал через большое сопротивление, зонд был отделен от усилителя конденсатором, а сам вход усилителя электрически заземлен и имел нулевой потенциал. Кроме переходных процессов, в момент включения батареи никакого влияния постоянный потенциал не оказывал на сигнал электрического отклика.

Этот прием использовался также для проверки наличия свободных зарядов в жидком гелии, например, возникающих за счет действия космического излучения [31]. Нормальная компонента будет увлекать заряды [30], и, в принципе, в стоячей волне возможно возникновение электрических резонансов. Постоянное поле $E \sim 3$ В/см, создаваемое потенциалом зонда, призвано, в меру подвижности зарядов от температуры ($\mu \sim 10^{-1} - 10^4$ см²/(В·с)), убирать их из измерительного пространства за времена от долей секунды до нескольких секунд [32], что должно проявляться как нестабильность наблюдаемых сигналов.

Здесь же заметим, что в конструкции резонатора и зонда, контактирующих с He II, нет материалов с выраженным пьезоэффектом. Таким образом, источником электрического отклика не является как прямое акустоэлектрическое преобразование, так и влияние свободных зарядов.

4.3. СМД сопротивление как источник резонансной наводки

При использовании проволочного источника второго звука, сопротивление которого в исследуемом диапазоне температур не менялось (пражская группа), этот источник резонансной наводки вообще отсутствовал, тем не менее сделаем оценку для СМД сопротивлений.

В работе харьковской группы в качестве источника второго звука использовались промышленные сопротивления СМД 100, 200, и 5,2 кОм. Все опробованные образцы служили хорошими источниками звука. К недостаткам следует отнести: СМД сопротивления имеют слабую зависимость $R(T)$, что приводит к дополнительным колебаниям сопротивления в меру $\Delta T/T \sim \Delta R/R$ и вызывает дополнительные колебания на третьей гармонике. Как было показано в разд. 4.1, напряжение десимметризации 0,1 В может привести к появлению

смещения на 100 нВ на первой гармонике. Подавление третьей гармоники будет еще выше, чем первой.

4.4. Источники термоконтактных ложных сигналов

Можно было предположить, что если тепловая волна проходит зонд до места спая с кабелем, то на границе разных материалов может возникнуть разность потенциалов, резонансно отслеживающая температуру волны второго звука. Анализ литературных источников по измерению термоконтактных потенциалов на соединении разных металлов свидетельствует, что исходя из типичного температурного наклона ($\beta \sim 10^{-7}$ В/К) их величины при этих температурах [33,34] намного меньше наблюдаемых резонансов. Оценки показывают, что осциллирующая часть термоконтактных потенциалов на соединении разных металлов при $\Delta T \sim 1$ мК не превышает $\sim 10^{-10}$ В. Таким образом, сколько-нибудь заметное влияние термоконтактных потенциалов на соединениях также исключено.

5. Результаты измерения электрического отклика в волне второго звука

В начальных экспериментах изучалось влияние температуры и мощности нагревателя на резонансы второго звука (положение, высоту, добротность) и проводилось сравнение с результатами литературных источников [2,28,35].

5.1. Амплитуды колебаний температуры ΔT

Спектры второго звука при сканировании с использованием болометра характеризовались резонансами ΔT на удвоенной частоте источника звука. В исследованном диапазоне частот наблюдались несколько высокودобротных мод. Амплитуда колебаний температуры наблюдалась до мощностей, при которых образуется паровая фаза вблизи нагревателя (~ 1 Вт/мм²) [35].

5.2. Измерение электрических откликов ΔU_e

Перед экспериментами по измерению электрического отклика осуществлялось сканирование по частоте при $T > 2,2$ К и определялся спектр дискретных промышленных наводок, величина и положение которых не изменялись с температурой.

Сначала представим результаты, полученные при использовании холодного предусилителя. Особенности спектров ниже T_λ — появление при определенных частотах колоколообразного увеличения амплитуды и прохождение фазы сигналов через ноль, характерные для резонанса. Результаты свидетельствовали о том, что емкость «электростатический зонд–земля» периодически перезаряжается на некоторых частотах с амплитудой выше амплитуды шумов. На последовательности рисунков рис. 6(а)–(г) можно проследить, что происходит с электрическим резонансом с изменением

температуры и мощности источника второго звука. Слева — амплитуды напряжения ΔU_e , справа — напряжения, пропорциональные фазе измеряемого сигнала, в зависимости от удвоенной частоты генератора. Как видно на рис. 6(а) и (б) изменение температуры от 1,73 до 1,95 К приводит к сдвигу частоты резонанса от 388 до 330 Гц. Соответственно, добротность на рис. 6(а) $Q \sim 300$ и (б), (в) $Q \sim 1000$ по результатам усреднения десяти сканов фазы (измерялись Δf между минимумом и максимумом фазы электрического отклика, $Q = f/\Delta f$). При фиксированной температуре и увеличении напряжения на излучателе сигнал увеличился, а частота осталась прежней (рис. 6(в)). Однако выше некоторых мощностей излучателя электрический резонанс исчезал (рис. 6(г)), что впервые было установлено в работах [4,5].

Надо отметить одну особенность, исчезновение электрического отклика всегда происходило раньше, чем исчезновение резонансов ΔT за счет образования пара вблизи источника звука [37]. В тоже время, как видно на рисунках, промышленная наводка на частотах ~ 350 и 375 Гц оставалась на месте всегда.

Малое значение сигнал/шум криогенного усилителя и существование критических мощностей, где сигнал исчезал, сильно усложняли наблюдения токовым методом. Это ограничило возможности рассмотрения количественной зависимости величины электрического отклика от мощности при использовании криогенного устройства прямого усиления. Трансимпедансный теплый усилитель с компенсацией входной емкости имел высокое входное (виртуальное) сопротивление ($R \sim 10^8$ Ом) за счет обратной связи и выгодно отличался от холодного усилителя. Поэтому ниже будут представлены результаты, полученные с трансимпедансным усилителем.

На рис. 7 представлены типичные данные электрического отклика при различных напряжениях на нагревателе. По горизонтальной оси — удвоенная частота при сканировании с шагом 0,01 Гц в окрестности $f = 412,2$ Гц. Добротность резонансов $Q \sim 300$. О величине сигнала можно судить путем сравнения с величиной калибровочного сигнала, подаваемого с другого генератора через холодный аттенуатор и видимого как биения (см. пик при $f = 410$ Гц), образующиеся от смешения сигналов сканирующего опорного и калибровочного генераторов. Это позволило определить коэффициент усиления всего усилительного тракта во время эксперимента. Отношение выходного сигнала к коэффициенту усиления показало, что в резонансе потенциал зонда достигал ~ 200 нВ при отношении сигнал/шум $\sim 50-70$. На рисунке видно, что максимум резонансов второго звука растет быстрее, чем по линейной зависимости от напряжения на нагревателе. Однако при $U_h = 0,88$ В отклик исчезает как и в опытах с холодным предусилителем (рис. 6(г)).

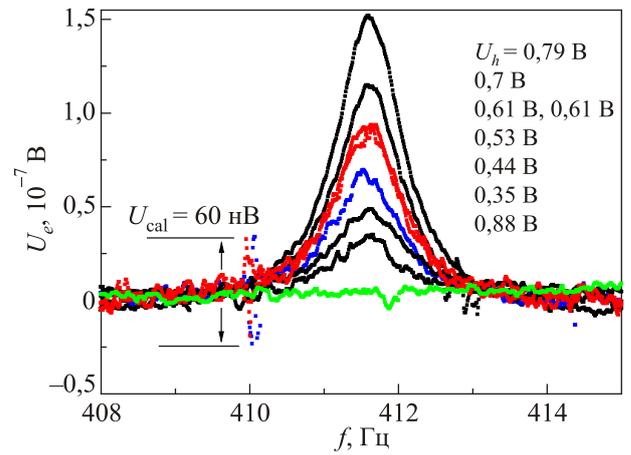


Рис. 7. (Онлайн в цвете) АЧХ электрического отклика при $T = 1,63$ К и разных мощностях тепловых потоков, измеренные с использованием трансимпедансного усилителя (рис. 4). U_h — напряжение на нагревателе. На частоте 410 Гц видны биения от смешения отклика и калибровочного сигнала, который подавался только при $U_h = 0,61$ В и $0,53$ В. Поляризация в резонансе составила $\sim 4 \cdot 10^{-13}$ Кл/м² для $U_h = 0,61$ В ($w = 8,1$ мВт/см²).

Температурный ход положения мод электрических откликов описывался выражением:

$$f_m = nV_2 / 2L \quad (5)$$

здесь L — длина резонатора, f_m — частота моды, n — номер моды, V_2 — скорость второго звука. По положению резонансов от температуры результаты двух групп совпадали, но отличались по величине амплитуды резонансов и добротности при одинаковых тепловых потоках w .

На рис. 8 изображена зависимость амплитуды резонансов от напряжения излучателя второго звука по данным рис. 7. Обработка результатов экспериментов показала, что электрический сигнал dU_e при малых напряжениях на нагревателе пропорционален $\sim U_h^2$ и

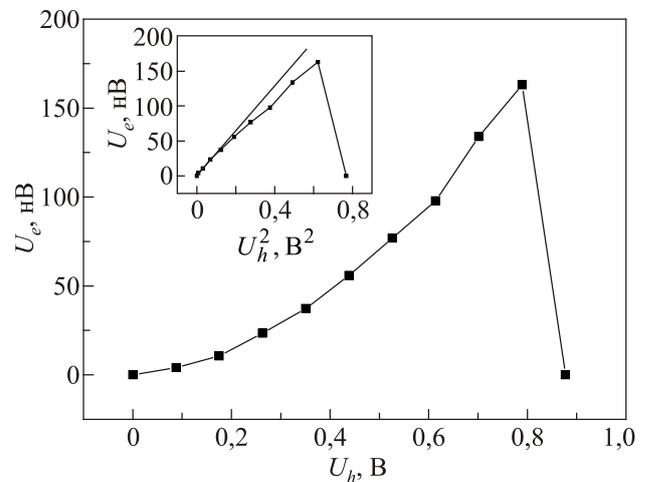


Рис. 8. Обработка результатов, изображенных на рис. 7. На вставке U_e в зависимости от U_h^2 .

исчезает выше некоторого, т.е. электрический отклик пропорционален мощности и не является емкостной наводкой, так как наводка обычно пропорциональна напряжению.

Интересно сравнить данные измерений двумя методами. В экспериментах харьковской группы переход от метода измерения «потенциала» к методу измерения «тока» осуществлялся без вскрытия резонатора, чтобы не менять коэффициент тепловой связи через щель заполнения. В случае криогенного усилителя измерялся ток заряда емкости C_p через сопротивление 10 МОм (далее именуется токовый метод). В случае теплового усилителя фиксировался потенциал зонда C_p (далее именуется метод заряда емкости), так как виртуальное входное сопротивление трансимпедансного усилителя было на много выше.

Для измерения плотности индуцированных зарядов методом измерения потенциала зонда необходимо знать точное значение входной емкости C_p (зонд + усилитель). На рис. 9 изображена эквивалентная схема и результаты измерений входной емкости теплового усилителя во время эксперимента, когда источником служил непосредственно электрический отклик, сопровождающий пятую моду стоячей волны второго звука ($f_{\text{res}}=1573,8$ Гц, $T=2,05$ К). При подключении одной из калибровочных емкостей сигнал уменьшался, при отключении быстро восстанавливался. Четко видны ступеньки уменьшения сигнала, тем больше, чем больше шунтируемая емкость. По измеренным потенциалам и соотношению $ne = C_p U_0 = (C_p + C_{\text{cal}}) U_1$ вычисляем C_p , а затем плотность индуцированных зарядов n . Это позволяет оценить и внутреннее сопротивление неизвестного источника электрического отклика. Шунтирование емкостью ~ 2 пФ (реактанс $\frac{1}{2}\pi f C \sim 50$ МОм) входа усилителя приводит к снижению сигнала в два

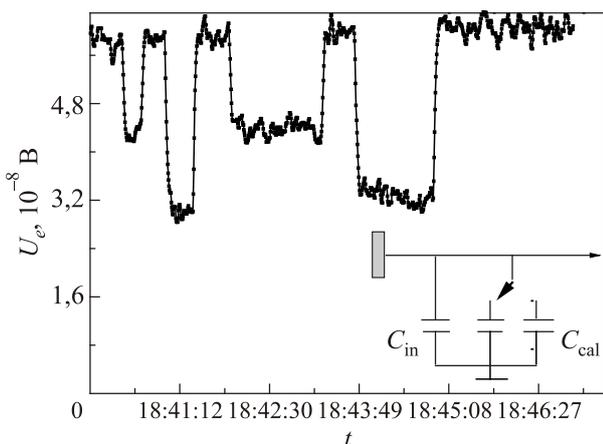


Рис. 9. Изменение величины индуцированного потенциала в стоячей волне второго звука пятой моды $f_{\text{res}} = 1573,8$ Гц ($T = 2,05$ К) при шунтировании входной емкости C_{in} усилителя одной из калибровочных емкостей C_{cal} ($\sim 1,3$ или ~ 2 пФ). На вставке показана схема подключения одной из C_{cal} .

раза. Это означает, что внутреннее сопротивление источника такого же порядка.

На рис. 10 представлены результаты АЧХ плотности индуцированных зарядов, пересчитанные по данным, снятым при одинаковых условиях в разное время двумя методами: по методу заряда известной емкости и токовым методом:

$$n = C_p U_e / e = i / 2\pi f e = U_R / 2\pi f e R, \quad (6)$$

здесь U_e — измеряемое индуцируемое напряжение на входной емкости C_p теплового усилителя, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, U_R — измеряемое напряжение на входном сопротивлении криогенного усилителя, i — ток, протекающий через сопротивление электрод–земля с частотой f , R — входное сопротивление криогенного усилителя. Как правило, $U_e \geq U_R$. Холодный усилитель, используемый для измерений токовым методом, имел при $T \sim 2$ К входное сопротивление 10 МОм, что сравнимо с сопротивлением источника. Оба метода показали одинаковые результаты по величине индуцированного заряда, добротности резонансов ($Q \sim 400$) и внутреннему сопротивлению. Таким образом, измерения двумя методами подтвердило наличие электрических сигналов, сопровождающих второй звук [3–5,28].

На рис. 11 показаны результаты измерения электрического отклика, полученные в Праге при помощи SR-830 (входное сопротивление 10 МОм) и SR-560 (входное сопротивление 100 МОм). Факт, что сигналы сравнимы, свидетельствует о том, что внутреннее сопротивление источника электрического отклика меньше 10 МОм. Несовпадение экспериментальных зависимостей $dU_e = f(w)$, при близких w , используемых в двух группах, не должно смущать, так как тепловая связь излучателя звука с ванной в двух экспериментах различная. Кроме того, проволочный нагреватель перекрывал всю площадь отражения, в то время как СМД пленка — шестую часть площади. Все это приводит к

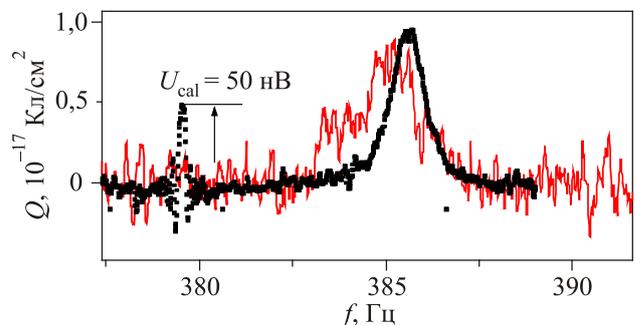


Рис. 10. (Онлайн в цвете) Электрический отклик при возбуждении волны второго звука. Сравнение методов харьковской группы: темные линии — метод «потенциала», светлые линии — «токовый» метод, $T = 1,74$ К, $U_h = 0,25$ В ($w = 1,4$ мВт/см²).

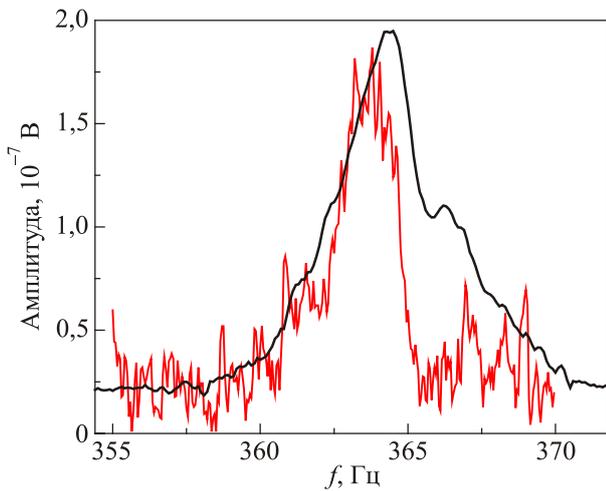


Рис. 11. Результаты опытов пражской группы. Характерные сигналы электрического отклика: более светлая кривая получена при прямом подключении электрода к фазовому детектору (рис. 5(б)), черная кривая соответствует измерению при подключении по дифференциальной схеме с предусилителем SR-560 (рис. 5(а)). Температура $T = 1,96$ К и мощность возбуждения второго звука $\sim 0,7$ мВт/см².

тому, что внутренние сопротивления источников электрического отклика в двух экспериментах сильно различались.

Обработка результатов экспериментов показала, что как температурные колебания ΔT , так и электрический отклик ΔU_e при малых мощностях пропорциональны $\sim U_h^2$. Однако, несмотря на одинаковую начальную зависимость указанных параметров от U_h , при дальнейшем увеличении мощности наблюдается уменьшение сигнала ΔU_e и его полное исчезновение, в то время как ΔT выходит на плато и затем медленно продолжает увеличиваться [2,4,5]. Факт исчезновения отклика при больших плотностях тепловых потоков нельзя объяснить ни одним из рассмотренных выше типов наводки. Предположительно сигнал является результатом поляризации жидкости, сопровождающей ламинарные относительные потоки нормальной и сверхтекучей компоненты. Доказательством возникновения поляризации в потоках служит следующее: в настоящей работе площадь зонда составляла 0,2 см², площадь электрода работы [28] была 0,03 см². Сравнимые величины индуцируемых зарядов на единицу площади при одинаковых условиях обеих работ свидетельствует о поступлении сигнала отклика именно через зонд и об отклике на поляризацию жидкости. Исчезновение отклика связано с нарушением упорядочения в системе электрических моментов при образовании турбулентности, что требует в дальнейшем более тщательной экспериментальной проверки.

Из представленных выше зависимостей, тестов, оценок следует, что мы наблюдаем необычное явление — динамическую поляризацию жидкости, которая состо-

ит из, казалось бы, электрически нейтральных атомов. Амплитуда колебаний температуры ΔT в волне второго звука является мерой изменения энтропии. Возможно, амплитуда поляризации ΔU_e характеризует меру ламинарного относительного потока в сверхтекучем гелии.

Таким образом, главным результатом работ [3–5,28] и настоящей является наблюдение еще одного параметра второго звука, а именно: динамической поляризации, амплитуда которой линейно связана с колебаниями температуры в волне второго звука. В будущем предстоит установить количественное соотношение между ΔU_e и ΔT при малых w , выяснить роль турбулентности и сравнить наблюдаемый феномен электрического отклика на волну второго звука с уже известными и хорошо изученными эффектами поляризации диэлектриков, например, поверхностным пьезоэлектричеством.

6. Выводы

Проведена верификация наблюдаемого электрического отклика при помощи различных усилителей. Установлено, что наблюдаемый сигнал электрического отклика не связан с внешней помехой или внутриаппаратурной наводкой. Подтверждено, что стоячая волна второго звука в сверхтекучем гелии сопровождается возникновением поляризации жидкости. Подтверждено существование критической мощности волны второго звука, впервые наблюдавшейся в [4,5], выше которой поляризация исчезает.

Данная работа выполнена в рамках украинско-чешского проекта № Ф52/251–2013.

1. Л.Д. Ландау, *ЖЭТФ* **11**, 592 (1941).
2. В.П. Пешков, *ЖЭТФ* **16**, 1000 (1946).
3. А.С. Рыбалко, *ФНТ* **30**, 1321 (2004). [*Low Temp. Phys.* **30**, 994 (2004)].
4. T.V. Chagovets, *Fiz. Nizk. Temp.* **42**, 230 (2016) [*Low Temp. Phys.* **42**, 176 (2016)].
5. T.V. Chagovets, *Physics B* **1**, 9872 (2016).
6. А.М. Косевич, *ФНТ* **31**, 50 (2005) [*Low Temp. Phys.* **31**, 37 (2005)]; А.М. Косевич, *ФНТ* **31**, 1100 (2005) [*Low Temp. Phys.* **31**, 839 (2005)].
7. L.A. Melnikovsky, *J. Low. Temp. Phys.* **148**, 559 (2007).
8. В.Д. Нацик, *ФНТ* **33**, 1319 (2007) [*Low Temp. Phys.* **33**, 999 (2007)]; В.Д. Нацик, *ФНТ* **34**, 625 (2008) [*Low Temp. Phys.* **34**, 493 (2008)].
9. В. Ходусов, *Вісник Харківського Університету, Сер. фізична «Ядра, частини, поля»* **642**, 79 (2004), там же, **721**, 31 (2006).
10. Э.А. Пашицкий, С.М. Рябченко, *ФНТ* **33**, 12 (2007) [*Low Temp. Phys.* **33**, 8 (2007)].
11. В.М. Локтев, М.Д. Томченко, *ФНТ* **34**, 337 (2008) [*Low Temp. Phys.* **34**, 262 (2008)].
12. Е.Д. Гутлянский, *ФНТ* **35**, 10, 956 (2009) [*Low Temp. Phys.* **35**, 748 (2009)].

13. С.И. Шевченко, А.С. Рукин, *Письма в ЖЭТФ* **90**, 46 (2009); С.И. Шевченко, А.С. Рукин, *ФНТ* **36**, 186 (2010) [*Low Temp. Phys.* **36**, 146 (2010)].
14. Э.А. Пашицкий, А.А. Гурин, *ЖЭТФ* **138**, 1103 (2010).
15. V.P. Mineev, *J. Low Temp. Phys.* **162**, 686 (2011).
16. В.Д. Ходусов, А.С. Наумовец, *Вісник ХНУ, Сер. фізична «Ядра, частинки, поля»*, № 899, Вип. 2 (46), 44 (2010).
17. V.M. Loktev and M.D. Tomchenko, *Ukr. J. Phys.* **55**, 901 (2010).
18. M.D. Tomchenko, *J. Low Temp. Phys.* **158**, 854 (2010).
19. S.I. Shevchenko and A.S. Rukin, *Fiz. Nizk. Temp.* **36**, 186 (2010) [*Low Temp. Phys.* **36**, 146 (2010)].
20. V.P. Mineev, *J. Low Temp. Phys.* **162**, 686 (2011).
21. V.M. Loktev and M.D. Tomchenko, *J. Phys. B* **44**, 035006 (2011).
22. M.D. Tomchenko, *Phys. Rev. B* **83**, 094512 (2011).
23. R.V. Grigorishin and B.I. Lev, *Ukr. J. Phys.* **53**, 635 (2008).
24. И.Н. Адаменко, Е.К. Немченко, *ФНТ* **41**, 635 (2015) [*Low Temp. Phys.* **41**, 495 (2015)].
25. И.Н. Адаменко, Е.К. Немченко, *ФНТ* **41**, 335 (2016) [*Low Temp. Phys.* **41**, 258 (2010)].
26. A.S. Rybalko, V.A. Tikhiy, A.S. Neoneta, and K.R. Zhekov, arXiv: 1108.1272.
27. V.F. Mitin, *Adv. Cryog. Eng.* **43**, 749 (1998).
28. A.M. Korolev, V.M. Shulga, I.A. Gritsenko, and G.A. Sheshin, *Cryogenics* **67**, 31 (2015); A.M. Korolev, V.M. Shulga, O.G. Turutanov, and V.I. Shnyrkov, *Instrum. Exp. Tech.* **58**, 478 (2015).
29. В.С. Гутников, *Применение операционных усилителей в измерительной технике*, Энергия, Ленинград (1975), с. 39.
30. H. Maris, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77**, 111008 (2008).
31. G. Careri, U. Fasoli, F.S. Gaeta, *Nuovo Cimento*, **15**, 774 (1960).
32. Ю.З. Ковдря, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук, *Особенности движения заряженных частиц в жидком гелии* (1970).
33. Ф. Блатт, *Физика электронной проводимости в твердых телах*, Мир, Москва (1971), с. 235.
34. N. Cusack and P. Kendall, *Proc. Phys. Soc.* **72**, 899 (1958).
35. К.Н. Зиновьева, *ЖЭТФ* **25**, 235 (1953).

The electric response in the wave of second sound: the instrumental aspect

A.S. Rybalko, T.V. Chagovets, and A.M. Korolev

The paper presents a detailed description of the standard measurement methods and original technical solutions, used by the authors in studies of newly discovered phenomena of electrical response in the wake of the second sound. Presents the most successful schemes of amplifiers used for precision low-temperature measurements, as well as a sensitivity analysis of the different measuring systems. The main objective of the work — study the reliability of the electrical activity of the effect occur ring in the cavity with the He II in the excitation wavelength of the second sound. It is shown that the observed electrical response signal is not connected to external interference or internal pickups, and is not the result of any direct acoustoelectric conversion or thermo-contact potentials. An analysis and comparison of new experimental data from two research groups are presented.

PACS: 84.30.Le Amplifiers;
67.25.dw Superfluidity in small clusters.

Keywords: second sound, electrical response, precision low-temperature measurements.