

## Наблюдение электрической индукции, обусловленной волной второго звука в He II

А.С. Рыбалко

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

Статья поступила в редакцию 29 июля 2004 г.

Экспериментально показано, что относительное движение сверхтекучей и нормальной компонент He II в волне второго звука сопровождается появлением электрической индукции. Процесс носит обратимый характер. Показано, что отношение амплитуд колебаний температуры к колебаниям потенциала индукции является константой, равной  $2,3 \cdot 10^4$  К/В, не зависящей от температуры.

Експериментально показано, що відносний рух надплинної і нормальної компонент He II в хвилі другого звуку супроводжується появою електричної індукції. Процес носить зворотний характер. Показано, що відношення амплітуд коливань температури до коливань потенціалу індукції є константою, рівною  $2,3 \cdot 10^4$  К/В, не залежною від температури.

PACS: 67.40.Pm

### Введение

Вопрос о возможной связи макроскопического сверхтекучего движения и электрических свойств конденсированного гелия является практически неизученным аспектом физики сверхтекучего  $^4\text{He}$ . В настоящей работе впервые экспериментально развивается идея о взаимосвязи внутренних электрических полей и незатухающих сверхтекучих потоков жидкого гелия ниже  $T_\lambda$ .

Согласно двухжидкостной модели He II, гидродинамика этой системы может быть описана с помощью введения двух полей скоростей — сверхтекучего движения со скоростью  $V_s$  и нормального движения со скоростью  $V_n$ . Одним из наиболее удобных способов возбуждения этих движений является генерация первого или второго звука. Известно, что в волне первого звука обе компоненты колеблются синфазно ( $V_s = V_n$ ), а в волне второго звука они движутся в противофазе, т.е.  $V_s = -V_n \rho_n / \rho_s$ , где  $\rho_n$  и  $\rho_s$  — плотности соответственно нормальной и сверхтекучей компонент He II. Кроме того, первый звук — волна плотности (дав-

ления), а второй звук — температурная волна, и зацепление между ними происходит лишь в меру коэффициента теплового расширения, которым вследствие его малости можно пренебречь.

Хотя в настоящее время первый и второй звуки весьма детально исследованы, но до сих пор остается невыясненным вопрос об их влиянии на электрические свойства He II и, прежде всего, на его поляризацию.

Одно из специфических свойств сверхтекучего гелия можно использовать для изучения физики процессов, происходящих внутри He II. Как известно, при нагревании стенки сосуда в перпендикулярном ей направлении в сверхтекучем гелии возникают противотоки нормальной и сверхтекучей компонент. В свою очередь, относительное движение нормальной и сверхтекучей компонент является следствием действия на микроскопическом уровне внутренних сил в жидкости, связанных с кинетикой установления равновесия макроскопического квантового состояния. Четко выделенное направление вектора сил позволяет поставить вопрос:

возникает ли при этом электрический мультипольный момент жидкости или нет?

В настоящей работе сообщаются результаты первых экспериментов по поиску и изучению электрического отклика, вызванного вторым звуком в сверхтекучем гелии.

### Экспериментальная методика

Эксперименты с первым и вторым звуками проведены резонансным методом в интервале температур 1,3–4,2 К в двух резонаторах с рабочими длинами 1,05 и 28 мм. Для уменьшения поверхностных потерь их внутренние стенки были полированы и позолочены.

Блок-схема измерений была традиционной: сигнал от генератора поступал на излучатель звука и опорное плечо усилителя. Использование Lock-in усилителя, двойная экранировка входных цепей, компенсация входной емкости и автономное питание предусилителя позволили довести чувствительность по напряжению до  $3 \cdot 10^{-9}$  В в полосе 1 Гц.

Излучателем и приемником первого звука служили пьезокерамические датчики. Для возбуждения второго звука использовался тонкопленочный нагреватель из золота или меди. Приемником второго звука служил тонкопленочный болометр из окиси рутения с чувствительностью  $6,7 \text{ К}^{-1}$ , который позволял уверенно измерять амплитуду колебаний температуры  $\Delta T$ , вызванную вторым звуком, вплоть до  $10^{-6}$  К.

Как известно, важной электрической характеристикой диэлектрика является его поляризуемость. Она может быть измерена, если поместить диэлектрик между пластинами плоского конденсатора. Особенность экспериментов состояла в том, что резонатор и конденсатор для измерения поляризуемости He II были совмещены в одном устройстве. То есть резонаторы первого и второго звуков выполняли также роль конденсаторов для регистрации возможного появления электрической индукции (смещения) в исследуемом He II. В экспериментах одной обкладкой конденсатора служил электрод, который помещался на место болометра, а другой обкладкой — корпус резонатора. Значение разности потенциалов конденсатора определялось величиной индуцированного заряда, деленного на входную емкость  $\Delta U = \Delta Q / C_{\text{in}}$ . В качестве измерительного электрода в разных опытах использовались пленка золота, массивная латунь и окись рутения.

Таким образом, меняя датчики на торцах резонаторов, можно было проводить измерения как амплитуды звука, так и наблюдать за электрическими свойствами по величине заряда, индуцируемого на электроде.

### Экспериментальные результаты

В таблицу сведены серии опытов с двумя резонаторами при использовании различных излучателей и приемников.

Таблица

Характеристики серий опытов

№ серии	Излучатель звука	Приемник звука	Регистрируемая величина	Резонатор 1,05 мм	Резонатор 28 мм
1	нагреватель	болометр	$\Delta T$	+	+
2	нагреватель	электрод	$\Delta U$	+	
3	конденсатор	болометр	$\Delta T$		+
4	конденсатор	электрод	$\Delta U$		+
5	пьезодатчик	пьезодатчик	$\Delta P$	+	
6	пьезодатчик	электрод	$\Delta U$	-	

Примечание: Измеряемые величины  $\Delta T$  и  $\Delta U$  — амплитуды колебаний температуры и потенциала электрода в волне второго звука,  $\Delta P$  — амплитуда колебаний давления в волне первого звука, знаки «+» и «-» соответствуют наблюдаемой или ненаблюдаемой в опытах соответствующей амплитуды.

После конденсации жидкого гелия в измерительную камеру, заполнения резонаторов через сверхщель и стабилизации температуры снимались амплитудно-частотные характеристики измерительных устройств для каждой серии опытов.

1. На рис 1,а приведены типичные резонансные кривые колебаний температуры  $\Delta T$ , которые традиционно возникают при распространении второго звука в He II (см. табл., серия № 1). При этом данные, полученные как для скорости второго звука, так и поглощения (определяемому из ширины резонансов), прекрасно совпадают с величинами, приведенными в литературе [1,2].

После замены болометра электродом, чувствительным к электрической индукции (смещению), был получен необычный результат: появлялись четкие резонансы электрической индукции  $\Delta U$  (рис. 1,б) на тех же частотах, что и для  $\Delta T$  (см. табл., серия № 2). Укажем, что наши измерения для области выше  $\lambda$ -точки показали отсутствие сигнала  $\Delta U$ . Он появлялся лишь в области He II, и его амплитуда увеличивалась с понижением температуры.

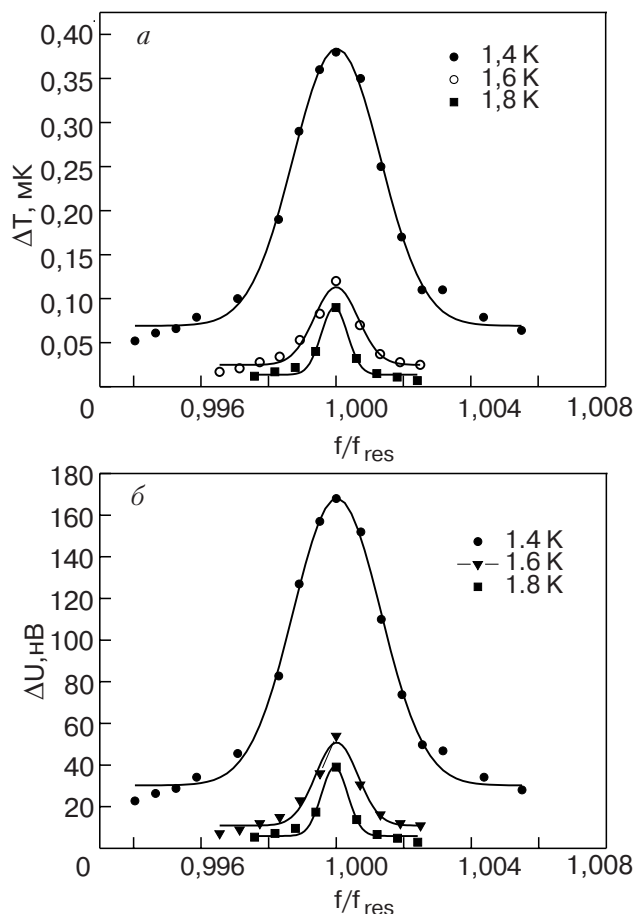


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики резонатора второго звука; а) амплитуда колебаний температуры болометра (серия № 3); б) амплитуда колебаний потенциала электрической индукции (серия № 4). Точки — экспериментальные результаты, сплошная линия — результат обработки с помощью распределения Гаусса.

Чтобы исключить возможную термоэдс на приемном электроде, обусловленную тепловым сопротивлением Капицы, пленочный электрод был заменен массивным латунным электродом (отдельные эксперименты, входящие в серию № 2). При этом за счет более высокой теплоемкости время тепловой релаксации было на несколько порядков больше  $f_{\text{res}}^{-1}$ , а величины амплитуд  $\Delta U$  существенно не изменились. Это однозначно свидетельствовало об отсутствии термоэдс.

С целью проведения сравнительных измерений в части экспериментов серий № 3 и № 4 болометр служил как для измерений осцилляций  $\Delta T$  в волне второго звука, так и колебаний индуцируемого заряда  $\Delta Q = \Delta U C_{\text{ин}}$ . Для этого достаточно было перекоммутировать выводы болометра соответствующим

образом. При этом не нарушалась параллельность противоположных стенок резонатора и площадь приемников была одинаковой.

Проведенные опыты позволили убедиться, что сигнал электрической индукции не зависит от материала электрода; добротности линий  $\Delta T(f)$  и  $\Delta U(f)$  равны, и в исследуемом интервале температур их значения составляют 700–4000.

Специальными опытами было проверено, что сигнал  $\Delta U$  не является результатом емкостной наводки или вибраций.

Обычно появление электрического смещения диэлектрика означает, что в нем присутствуют электрические мультиполи и их поляризация. Например, электрическая поляризация твердых тел возникает под воздействием внешнего электрического поля  $E_{\text{ext}}$  или механических напряжений. В наших опытах наблюдалась электрическая индукция He II в присутствии  $V_s - V_n$ , но при  $E_{\text{ext}} = 0$ . Как известно, постоянный электрический момент в атомах He отсутствует. Поэтому полученный результат является неожиданным.

2. С целью выяснения связи между внутренними электрическими полями и сверхтекучими потоками были проведены следующие эксперименты. Использование усилителя с синхронным детектором позволило определить полярность индуцированного потенциала относительно вектора скорости сверхтекучей компоненты. Известно, что всегда при протекании электрического тока через нагреватель сверхтекучая компонента устремляется к источнику тепла. Этот факт использовался для привязки полярности индуцируемого потенциала к вектору скорости  $\mathbf{V}_s$ . Оказалось, что при движении сверхтекучей компоненты от электрода к нагревателю на первом индуцируется положительный заряд. Это стало понятным после учета изменения фазы сигнала при его прохождении в измерительных цепях и усилительном тракте.

3. Представлялось естественным провести поиск обратного эффекта — возбуждения волны второго звука в результате искусственной поляризации сверхтекучего гелия электрическим полем\*. С этой целью в резонаторе второго звука длиной 28 мм нагреватель был заменен конденсатором электрод–сетка. Сетка была соединена с корпусом. Диаметр проволочек сетки после травления составил 3–5 мкм, а шаг 100 мкм. При приложении потенциала между электродом и сеткой часть жидкости на краю резонатора в зазоре длиной 0,6 мм (~ 2% от общей длины) поляризовалась. Наличие сетки, малое попе-

\* На возможность обратимости эффекта указал проф. А.М. Косевич.

речное сечение (3×1,4 мм) и большая длина резонатора надежно защищали болометр от емкостной наводки.

В таких условиях оказалось возможным возбудить волну второго звука (серия № 3). На рис. 1 представлены зависимости как  $\Delta T$ , так и величины  $\Delta U$  от частоты возбуждающего сигнала. Видно, что  $\Delta T$  (серия № 3) и  $\Delta U$  (серия № 4) ведут себя примерно одинаково.

Измерения тангенса угла потерь источника второго звука, альтернативного нагревателю, показали, что его реальной составляющей мощности недостаточно для возбуждения резонатора.

Установлено, что амплитуды переменного потенциала электрода и колебаний температуры болометра возрастают пропорционально квадрату тока нагревателя при малых его значениях (серии № 1, № 2). При использовании второй методики возбуждения волны второго звука — пропорционально величине электрического поля в первой степени (серии № 3, № 4).

Пока осталось не ясным, что отвечает за возбуждение волнового процесса — градиент электрического поля вблизи проволочек сетки или величина поля в зазоре.

4. С целью выяснения влияния механических напряжений на электрические свойства сверхтекучего гелия был выполнен ряд опытов с обычным звуком. Эксперименты, проведенные с первым звуком (серии № 5, № 6) по аналогичной схеме\*, показали, что в этом случае электрическая индукция не возникает даже при больших мощностях, подаваемых на излучатель (знак «-» серии № 6).

Таким образом, эффект возникает только при наличии относительного движения нормальной и сверхтекучей компонент в He II. Проведенные эксперименты позволили сделать вывод, что эффекты электрической индукции и противоположного движения сверхтекучей и нормальной компонент в волне второго звука носят обратимый характер.

### Обсуждение результатов

На рис. 2 приведено соотношение измеренных значений  $\Delta T$  и соответствующих значений  $\Delta U$  при одних и тех же условиях: мощности излучения и температуре. Величину  $\Delta T$  естественно рассматривать как характеристику тепловой энергии системы, а  $\Delta U$  — электростатической энергии. Как видно, это отношение не зависит от температуры и является

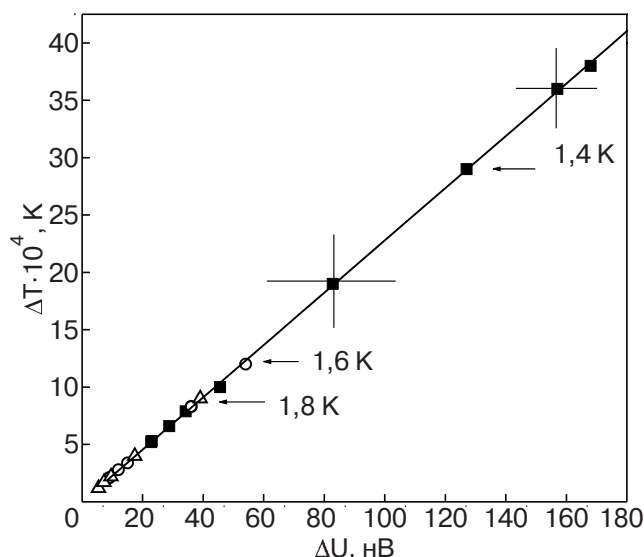


Рис. 2. Соотношение сигналов болометра  $\Delta T$  и потенциала электрического смещения резонатора  $\Delta U$  при одной и той же подаваемой мощности на излучатель, индуцируемых волной второго звука для разных температур. Сплошная линия проведена по точкам.  $\text{tg } \alpha = \Delta T / \Delta U = 2,3 \cdot 10^4 \text{ K/V}$

константой. Тангенс угла наклона  $\text{tg } \alpha = \Delta T / \Delta U$  равен  $2,3 \cdot 10^4 \text{ K/V}$  с точностью  $\pm 25\%$ . Отметим, что эта величина близка к значению  $2e/k = 2,3188 \cdot 10^4 \text{ K/V}$ . Здесь  $e$  — заряд электрона,  $k$  — постоянная Больцмана.

Таким образом, в работе установлено, что обнаруженное явление связано с относительным движением компонент He II. Осталось невыясненным влияние на эффект направления  $V_s - V_n$  относительно поверхности\*\*. Возможно, что обнаруженный эффект является следствием потоков, которые, согласно двухжидкостной гидродинамике [3], могут возникать вдоль поверхности, на которой происходит выделение или поглощение тепла.

В качестве более фундаментальной причины можно предположить существование неустоивленной пока связи сверхтекучего перехода с электрическими свойствами гелия. Например, обнаруженное электрическое смещение и противотоки сверхтекучей и нормальной компонент являются следствием, с одной стороны, каких-то внутриатомных обменных процессов, а с другой, — упорядочения в жидкости на макроскопических расстояниях. В пользу такой точки зрения свидетельствует два экспериментальных факта.

\* Постановка задачи с первым звуком принадлежит проф. Э.Я. Рудаковскому.

\*\* Это интересное предположение было высказано проф. В.Н. Григорьевым.

1. Измеренная зависимость полярности индуцируемого сигнала на электроде от направления  $V_s$  указывает, что образующийся в жидкости макроскопический электрический диполь своим положительным зарядом направлен в сторону движения сверхтекучей компоненты (серии № 2, № 4).

2. Второй звук в He II можно возбуждать несколькими способами: тепловым [1], механическим [1] и электрическим (в настоящей работе).

Следует заметить, в настоящий момент не существует микроскопической теории, объясняющей появление электрического мультипольного момента атомов гелия, когда они находятся в жидком состоянии ниже  $T_\lambda$  и присутствует относительное движение сверхтекучей и нормальной компонент.

### Заключение

Проведенные эксперименты показали, что относительное движение сверхтекучей и нормальной компонент He II в волне второго звука сопровождается появлением электрической индукции и процесс носит обратимый характер. Выяснение механизмов, приводящих к наблюдаемым эффектам, требует дополнительных экспериментов, а также развития соответствующих теоретических представлений.

В заключение выражаю благодарность за обсуждение результатов В.Н. Григорьеву, А.М. Косевичу, Э.Я. Рудаковскому и А.А. Слуцкину.

1. В.П. Пешков, *ЖЭТФ* **18**, 857 (1948); *ЖЭТФ* **18**, 867 (1948).
2. К.Н. Зиновьева, *ЖЭТФ* **25**, 235 (1953).
3. Л.Д. Ландау, И.М. Лифшиц, *Гидродинамика*, Наука, Москва (1986).

### Observation of electrical induction in a wave of the second sound He II

A.S. Rybalko

It is shown experimentally that the relative motion of the superfluid and normal components of He II leads to electrical induction. The process has a reversible character. It is found that the ratio of the temperature oscillations and the oscillations of the induction potential is a constant equal to  $2,3 \cdot 10^4$  K/V and does not depend on temperature.