

ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ВИСМУТЕ

B.H.Копылов

Наблюдено распространение термомагнитных волн в висмуте, предсказанных Гуревичем и Гельмонтом в 1964 г. [1].

В экспериментах исследовалось прохождение сигнала звуковой частоты через образец висмута при наличии градиента температуры. Монокристалл висмута выращивался по методу Чохральского. Площадь сечения образца составляла $2 - 2,5 \text{ см}^2$. К верхней части образца приклеивался нагреватель. В средней части располагались две пары передающих катушек, подключаемых к звуковому генератору. На нижнем торце образца размещалась приемная катушка, сигнал с которой через широкополосный усилитель и синхронный детектор подавался на вход самописца. Катушки и образец окружались свинцовым экраном. Боковая

поверхность образца покрывалась слоем воска для уменьшения теплоподачи. Запись выходного сигнала можно было вести в функции от частоты генератора и тока через нагреватель, создававшего температурный градиент.

На рис. 1 показаны записи выходного сигнала $U_{\text{вых}}$ от тока через нагреватель I при разных температурах гелиевой ванны T . Видно, что при малых токах сигнал отсутствует. С увеличением тока появляется и растет осциллирующий сигнал, при этом с повышением температуры момент появления сигнала отодвигается в сторону больших токов. При $T \approx 4,12 \text{ К}$ сигнал практически отсутствует при достижимых градиентах температуры. Видно, также, что с частотой и током меняется период наблюдаемых осцилляций. Амплитуда сигнала максимальна при $T \approx 1,94 \text{ К}$ и уменьшается при изменении T в обе стороны.

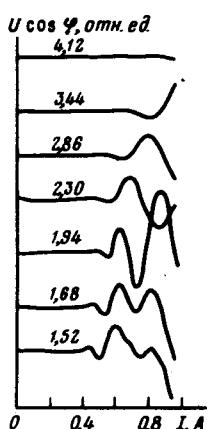


Рис. 1. Зависимость $U_{\text{вых}}$ от тока нагревателя, создающего градиент: числа у кривых указывают температуру гелиевой ванны в К, $f = 225 \text{ Гц}$

На рис. 2 показаны частотные зависимости сигнала при разных I . Видно, что с ростом частоты амплитуда сигнала уменьшается. С увеличением I амплитуда сигнала растет и момент исчезновения сигнала отодвигается вверх по частоте.

На рис. 3 показан пример частотной зависимости сигнала при разных расстояниях между приемной и передающей катушками. Видно, что с увеличением расстояния между катушками период осцилляций по частоте, амплитуда и верхняя частота, на которой осцилляции еще видны, уменьшаются. Кроме того, оказалось, что при подключении верхней катушки ко входу усилителя, а нижней к генератору, сигнал отсутствовал, т.е. наблюдалось несимметричное прохождение сигнала.

Наличие осцилляций естественно связать с распространением низкочастотных слабозатухающих волн в образце. При изменении длины волны фаза сигнала в приемной катушке меняется, что и приводит к появлению осциллирующего напряжения на выходе синхронного детектора. Единственными волнами, которые, на наш взгляд, могут распространяться в наших условиях, являются термомагнитные волны (ТМВ), предсказанные теоретически в [1].

Согласно [1] закон дисперсии ТМВ имеет вид

$$\omega = -\alpha_1 c (\nabla T \mathbf{k}) - i\rho c^2 k^2 / 4\pi, \quad (1)$$

где ω — круговая частота, c — скорость света в вакууме, α_1 — коэффициент Нернста — Эттингсгаузена, \mathbf{k} — волновой вектор, ρ — удельное сопротивление.

Условием слабого затухания является большое отношение действительной и мнимой частей, что может быть достигнуто уменьшением k . При слабом затухании закон дисперсии можно записать в виде

$$k(\omega) \approx k_1(\omega) + ik_2(\omega) \approx \frac{\omega}{c\alpha_1 |\nabla T|} \left(1 + i\omega \frac{\rho}{4\pi(\alpha_1 \nabla T)^2} \right). \quad (2)$$

Если ток в передающей катушке не зависит от частоты, то ЭДС, наводимая в приемной катушке $E \sim ie^{ik_1 d} (\omega e^{-k_2 d})$, где d — расстояние между катушками. При этом множитель в скобках определяет амплитуду принимаемого сигнала, а второй сомножитель — фазу.

$U \cos \phi$, отн. ед.

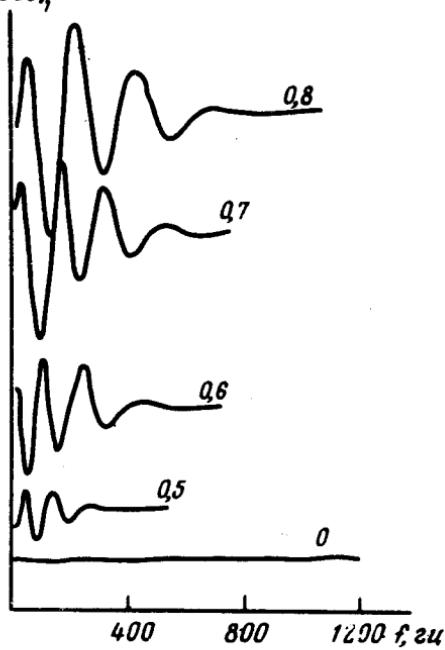


Рис. 2. Зависимость $U_{\text{вых}}$ от частоты при разных токах нагревателя, указанных цифрами на кривых: $T \approx 2,0 \text{ К}$

Оказалось возможным сопоставить периоды осцилляций кривых рис. 2, соответствующих разным токам. Найдено, что в пределах каждой кривой период осцилляций по частоте близок к константе и отношение периодов для разных кривых отношению квадратов тока. Этот факт легко интерпретировать. Периодичность сигнала по частоте означает линейность фазы $\phi = k_1 d$ принимаемого сигнала с частотой. С увеличением

I осцилляции становятся реже (соответствующий период $\sim I^2$), т.е. фаза $k_1 d$ с частотой меняется медленнее. Отсюда $k \sim \omega / I^2 \sim \omega / \sqrt{T}$. Экспериментальное подтверждение закона дисперсии является важным доказательством правильности модели явления.

Из рис.2 видно увеличение затухания с ростом f и уменьшением T , что следует из (2). С увеличением расстояния d сигнал уменьшается и пропадает на более низкой частоте, а период осцилляций уменьшается $\sim 1/d$ (рис.3). Этот факт связан с увеличением затухания и большим набегом фазы $k_1 d$ с ростом d .

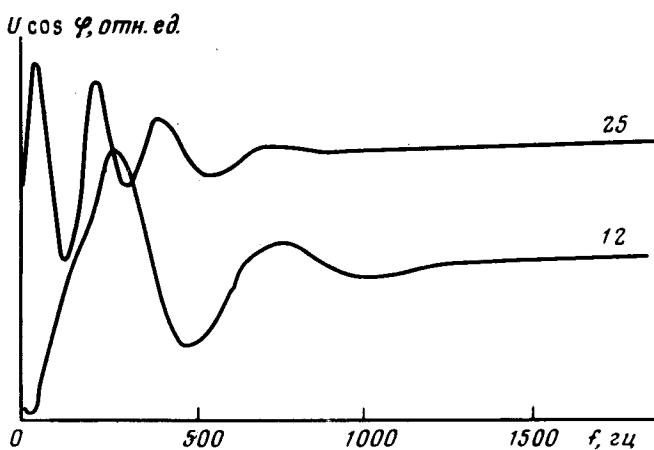


Рис. 3. Частотная зависимость $U_{\text{вых}}$ при разных расстояниях между катушками, указанных у кривых в мм

Измеренные зависимости позволяют из эксперимента определить действительную и мнимую части волнового вектора в функции от частоты, фазовую скорость и затухание волн, а отсюда такие параметры металла как α_1 и ρ . Такие оценки были проведены для верхней кривой рис.2. Величина \sqrt{T} определялась по известной мощности и коэффициенту теплопроводности [2]. При $\sqrt{T} \approx 0,2 + 0,25 \text{ К/см}$ скорость волны оказалась равной 370 см/сек при частоте 100 Гц и уменьшается на 30% при увеличении в 8 раз. Оценки для α_1 и ρ дают: $\alpha_1 \approx 6 \cdot 10^{-8}$ ед. CGSE, $\rho \approx 2,5 \cdot 10^{-19}$ ед. CGSE, что по порядку величины согласуется с результатами [2,3].

Другие доказательства правильности интерпретации наблюдаемого явления связаны с односторонним распространением ТМВ (волна идет против ∇T), что следует из (1) и тем фактом, что наилучшее прохождение волн наблюдается при $T \approx 2 \text{ К}$. Последнее обстоятельство связано с наличием максимума на кривой $\alpha_1(T)$ при $T = 3,5 \text{ К}$ [3] и уменьшением теплопроводности и сопротивления с понижением температуры в этой области, что должно приводить к смещению максимума эффекта в более низкие температуры, по сравнению с $T(\alpha_{1max})$.

Совокупность наблюдавших закономерностей, на наш взгляд, однозначно доказывает, что экспериментально наблюдено распространение термомагнитных волн.

Автор глубоко благодарит Е.П.Вольского за постановку задачи и ряд ценных замечаний, И.Н.Жиляева за предоставление совершенного монокристалла висмута, В.Ф.Гантмахера, Л.Э.Гуревича, Б.Л.Гельмонта и В.Т.Петрашова за обсуждение результатов работы.

Институт физики твердого тела
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
20 июня 1978 г.

Литература

- [1] Л.Э.Гуревич, Б.Л.Гельмонт. ЖЭТФ, 51, 183, 1966.
 - [2] В.Н.Копылов, Л.П.Межов-Деглин. ЖЭТФ, 65, 720, 1973.
 - [3] И.Я.Коренблит, М.Е.Кузнецов, С.С.Шалыт. ЖЭТФ, 56, 3, 1969.
-