

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ИМПЕДАНСА ОЛОВА ПРИ УСТАНОВЛЕНИИ СТОЯЧЕЙ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ И КВАНТОВЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ СКОРОСТИ ЗВУКА

Ю.П.Гайдуков, А.П.Перов, И.Ф.Волошин

При изучении электромагнитного возбуждения звука [1] в олове, находящемся в магнитном поле, нами были обнаружены три интересные особенности, имеющие, по-видимому, общую природу.

Методика представляла собой обычный радиоспектрометр с генератором Паунда — Найта. Она позволяла изучать как действительную, так и мнимую часть поверхностного импеданса образцов. Образцы были в форме дисков с диаметром 18 мм и толщиной $0,5 \pm 1$ мм. Нормали к плоскостям дисков параллельны оси [010] кристалла.

С помощью изменения направления поляризации падающей электромагнитной волны относительно кристаллографических осей можно было возбудить две поперечные звуковые волны, либо одновременно, либо по отдельности. Продольная звуковая волна возбуждалась, когда магнитное поле было отклонено от нормали к поверхности образца.

При изучении формы резонансных кривых акустического резонатора, которым является образец, на двухкоординатном самописце регистрировалась зависимость величины, пропорциональной производной действительной части поверхностного импеданса $\partial R/\partial f$ от частоты f при фиксированной величине магнитного поля H . В интервалах между резонансными частотами f_n ; ($n = 1, 3, 5 \dots$) величина $\partial R/\partial f$ монотонно и слабо зависит от частоты. В области резонанса зависимость $\partial R/\partial f$ представляет две приблизительно подобные друг другу группы пиков, которые занимают интервал частот Δf_n , составляющий примерно $10^{-2}f_n$. Этот интервал постоянен для различных типов волн и не зависит от величины H . Ширина некоторых отдельных пиков в группах составляет $2 \cdot 10^{-4}f_n$, т.е. добротность акустического резонатора не хуже $5 \cdot 10^3$.

Каждый тип волны дает характерную систему резонансных пиков, хотя вид ее зависит от номера резонанса n и в меньшей степени от величины H . С ростом числа n положение наиболее интенсивного пика в каждой из двух групп стабилизируется. Вместе с тем количество пиков меньшей интенсивности, имеющих характерную M -образную форму

увеличивается. Описанные явления наиболее четко наблюдаются для продольного звука (рис. 1). Отметим здесь, что неоднородность толщины образца и синхронизированные колебания различных мод акустического резонатора не объясняют полностью наблюдаемую форму резонансных кривых.

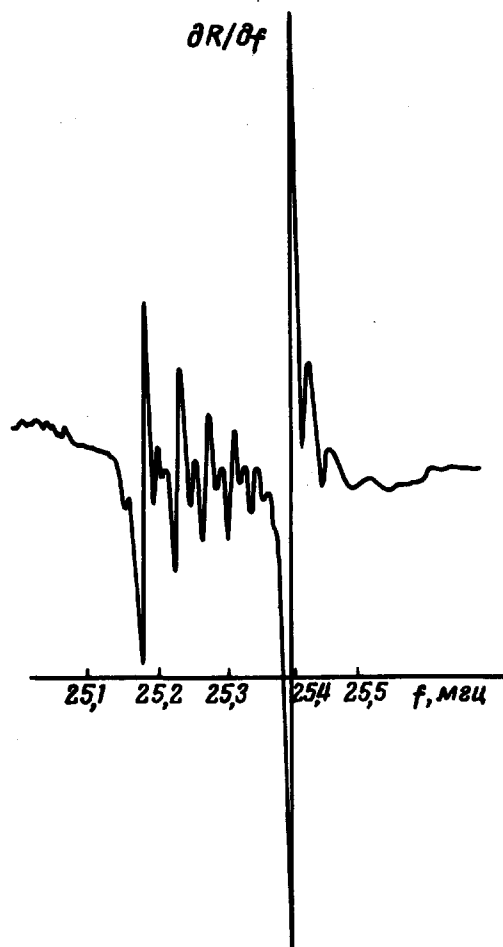


Рис. 1. Образец Sn-1. Зависимость производной $\partial R/\partial f$ от частоты в области, где $f_n \approx n f_0$; $n = 15$, $f_0 = 1,690$ мГц. Толщина образца $d = 1$ мм; $H = 40$ кэ, $T = 4,2^\circ\text{K}$, $H \parallel [110]$; ВЧ ток параллелен оси $[001]$

Квантовые осцилляции производной от действительной части поверхностного импеданса $\partial R/\partial H$ изучались для H , параллельного оси $[010]$. Вдали от резонансных частот наблюдались осцилляции трех периодов: при поляризации ВЧ поля E вдоль оси $[001]$ появляются осцилляции с периодами $P_1 = 2,3 \cdot 10^7 \text{ э}^{-1}$ и $P_2 = 4,7 \cdot 10^8 \text{ э}^{-1}$, при $E \parallel [100]$ — с пе-

риодами P $P'_1 = 2,3 \cdot 10^{-7}$ э $^{-1}$ и $P_3 = 6,5 \cdot 10^{-8}$ э $^{-1}$. Осцилляции с одинаковыми периодами $P_1 = P'_1$ хотя и наблюдаются при двух поляризациях, однако их амплитуды значительно отличаются¹⁾. Величины этих периодов хорошо согласуются с данными по эффекту де Гааза – ван Альфена [3].

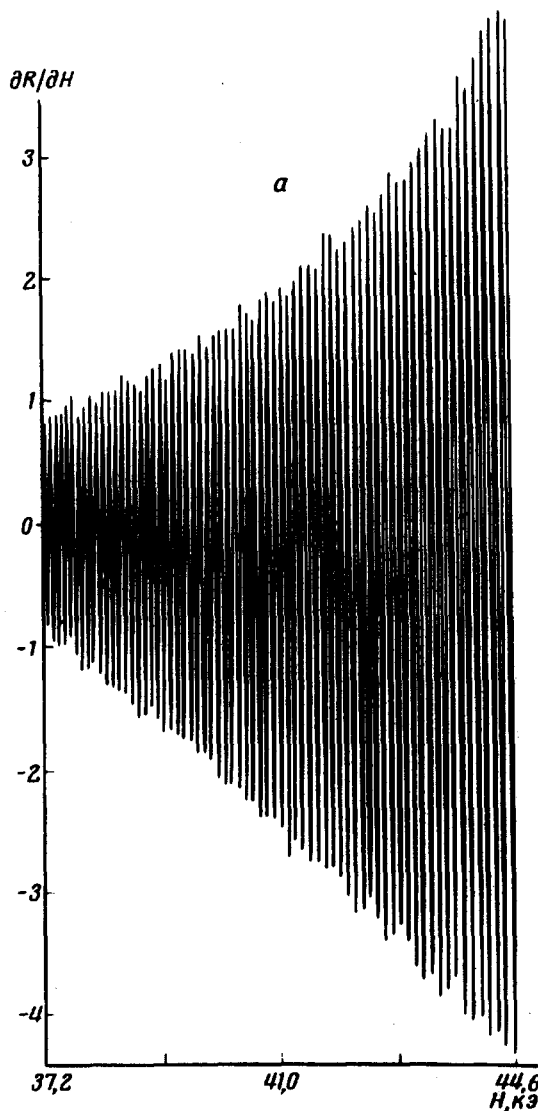


Рис. 2,а. Образец Sn-2. Зависимость производной $\partial R/\partial H$ от магнитного поля при двух фиксированных частотах и одинаковой чувствительности установки: $a - f = 5,428$ мГц

При установлении в образце стоячей звуковой волны амплитуды квантовых осцилляций значительно (примерно в 100 раз) возрастают

¹⁾ Проявление той или иной группы носителей в поверхностном импедансе при определенной поляризации ВЧ поля связано с формой орбиты экстремального сечения соответствующей части поверхности Ферми и как следствие, с различным вкладом электронов в поверхностный ток [2].

[4], при этом обнаруживаются две важные особенности: во-первых при поляризации $E \parallel [001]$ усиливаются осцилляции с периодами P'_1 и P_3 , а при $E \parallel [100]$ с периодами P_1 и P_2 . Такая перестановка свидетельствует о том, что основной вклад в импеданс при установлении стоячей волны приходится на толщу металла, а не на скин-слой, так как в толще металла поле E , связанное со звуком, повернуто относительно поля в скин-слое на угол $\pi/2$. Во-вторых, для определенной поляризации E в пределах одной резонансной группы можно найти такие близкие значения частоты f , при которых будут усиливаться осцилляции только одного периода. На рис. 2 дан пример такой избирательности.

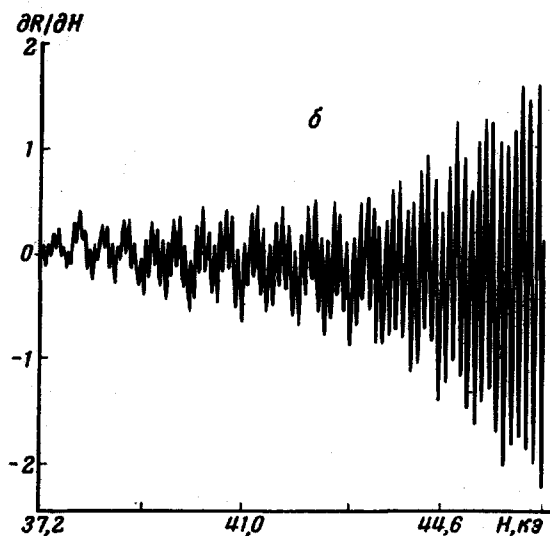


Рис. 2, б. Образец Sn-2. Зависимость производной $\partial R/\partial H$ от магнитного поля при двух фиксированных частотах и одинаковой чувствительности установки: $b - f = 5,457$ мкц. Толщина образца $d = 0,55$ мм; $H \parallel [010]$; ВЧ ток параллелен $[001]$; $T = 4,2^\circ \text{K}$

Для выяснения природы усиления квантовых осцилляций наряду с величинами $\partial R/\partial H$ были измерены производные от мнимой части поверхностного импеданса $\partial X/\partial H$. Сопоставление вида зависимостей $\partial R/\partial H(H)$ и $\partial X/\partial H(H)$ для разных частот вблизи резонанса, как было показано [5, 6], позволяет ответить на вопрос: является ли определяющим в образовании квантовых осцилляций поглощение или скорость распространения возбуждения. Измерения показали, что квантовые осцилляции, наблюдаемые при возбуждении стоячей звуковой волны, связаны с осцилляциями скорости звука в олове. При осцилляции скорости звука в максимуме резонансной кривой поверхностного импеданса амплитуда осцилляций $\partial R/\partial H$ должна быть минимальна, а у $\partial X/\partial H$ — максимальна. Это как раз и наблюдается экспериментально (рис. 3). Если подать сигнал с контура генератора на осциллограф, то при достаточно большой глубине частотной модуляции можно непосредственно наблюдать форму резонансных пиков поверхностного импеданса. В этом слу-

чае при медленном изменении магнитного поля можно видеть периодические смещения отдельных пиков. Эти смещения позволяют оценить относительную величину амплитуды квантовых осцилляций скорости

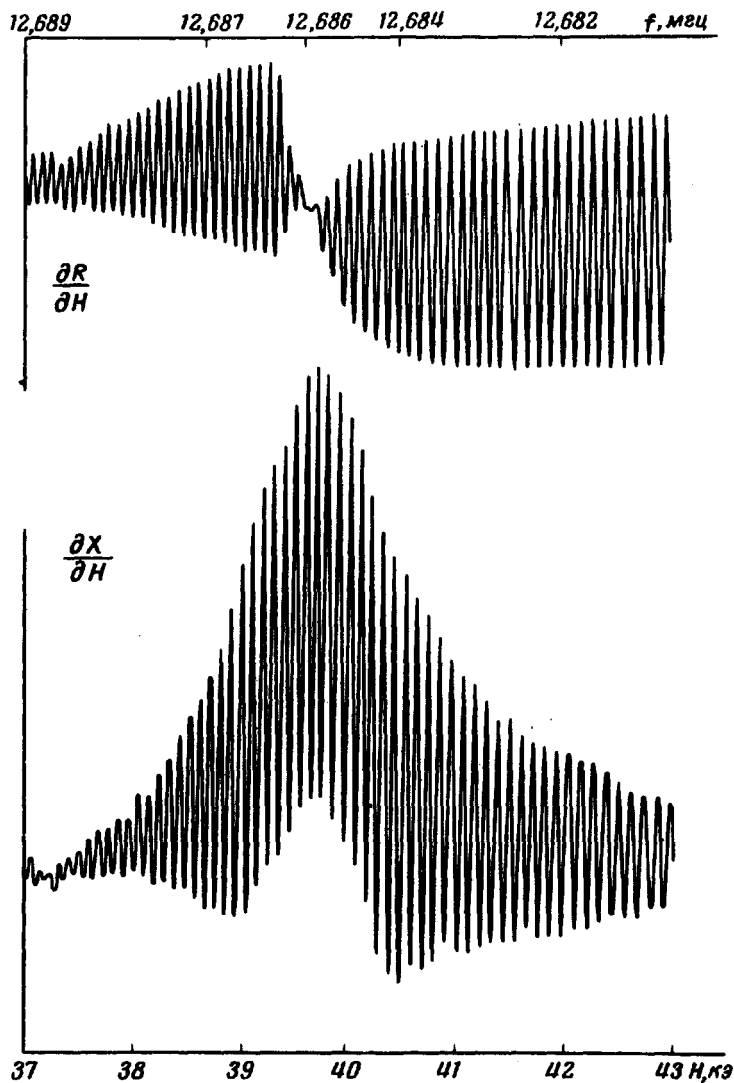


Рис. 3. Образец Sn-1. Зависимость амплитуды квантовых осцилляций при прохождении через резонанс $f_{\text{рез}} = 12,686 \text{ мГц}$. Прохождение частоты автодина через один из резонансных пиков в группе происходит одновременно с изменением величины H , $E \parallel [001]$, $T = 4,2^\circ \text{K}$

звука. Так в поле $H \sim 50 \div 60 \text{ кэ}$ для периода P_3 она равна примерно $2 \cdot 10^{-4}$, т.е. сравнима с шириной самого пика. Это и объясняет гигантскую величину усиления квантовых осцилляций при установлении стоячей звуковой волны.

Мы дали следующее объяснение описанным выше явлениям. Образец олова представляет собой две связанные системы — акустический резонатор, свойства которого задаются формой и модулями упругости, и электроны проводимости. Взаимодействие этих двух систем приводит к расщеплению мод акустического резонатора. Это расщепление может быть связано в частности с формой орбит и массой отдельных групп электронов проводимости. Например, форма орбиты электронов в магнитном поле может влиять на угол поворота вектора E ВЧ поля в толще образца. Вследствие этого с различными группами электронов будет связано различное значение скорости звука. Таким образом закономерности, наблюдавшиеся при возбуждении стоячих звуковых волн в олове можно использовать как метод для изучения отдельных групп носителей тока в металле.

Мы благодарны А.С.Боровику-Романову и М.С.Хайкину за полезное обсуждение результатов.

Московский
государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
19 марта 1969 г.
После переработки
11 апреля 1969 г.

Литература

- [1] В.Ф.Гантмахер, В.Т.Долгополов. Труды 10 международной конференции по физике низких температур, Москва. ЛТ-10, 3, 133, 1967.
- [2] Е.П.Вольский. ЖЭТФ, 46, 123, 1964.
- [3] M. D. Staffen, A. R. de Vroomen. Phys. stat. solid., 23, 675, 1967.
- [4] Ю.П.Гайдуков, А.П.Перов. Письма в ЖЭТФ, 8, 666, 1968.
- [5] Э.А.Канер, В.Г.Скобов. УФН, 89, 367, 1966.
- [6] И.П.Крылов. Письма в ЖЭТФ, 8, 3, 1968.

Письма в ЖЭТФ, том 9, стр. 590 — 594

20 мая 1969 г.

АКУСТИЧЕСКОЕ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ В АНТИФЕРРОМАГНИТНОМ $MnCO_3$

В.Р.Гакель

В работе обнаружена осцилляционная зависимость от магнитного поля интенсивности поперечного гиперзвука прошедшего через монокристалл антиферромагнетика $MnCO_3$.