

Письма в ЖЭТФ, том 13, стр. 150 – 153

5 февраля 1971 г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ ВБЛИЗИ ДЫРОЧНОГО ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА В ВИСМУТЕ

© В.П.Набережных, Д.Э.Жеребчевский, В.Л.Мельник

Спектр циклотронных волн, предсказанных Канером и Скобовым [1], состоит из трех ветвей. В случае сильной пространственной дисперсии ($KR \gg 1$, где K – волновое число, R – циклотронный радиус) две ветви спектра имеют нормальную дисперсию и лежат вблизи линии циклотронного резонанса со стороны сильных магнитных полей ($\omega < n\Omega$, где ω – частота электромагнитной волны, n – номер гармоники циклотронного резонанса, Ω – циклотронная частота), а третья ветвь имеет нормальную дисперсию и прижимается к резонансу со стороны слабого магнитного поля. При слабой пространственной дисперсии ($KR \ll 1$) все

ветви спектра в металлах с квадратичным законом дисперсии носителей имеют аномальную дисперсию и находятся вблизи резонанса со стороны сильного магнитного поля [2, 3]. В металлах с неквадратичным законом дисперсии возможно существование ветвей циклотронных волн при малых KR , удаленных от линии циклотронного резонанса. В скомпенсированных металлах, имеющих несколько типов носителей заряда (электронов и дырок) с равной концентрацией, в некоторых случаях могут существовать ветви спектра циклотронных волн при малых KR прижимающиеся к линии циклотронного резонанса не только со стороны сильных полей, как в случае продольной поляризации [4, 5], но и со стороны слабых полей¹⁾.

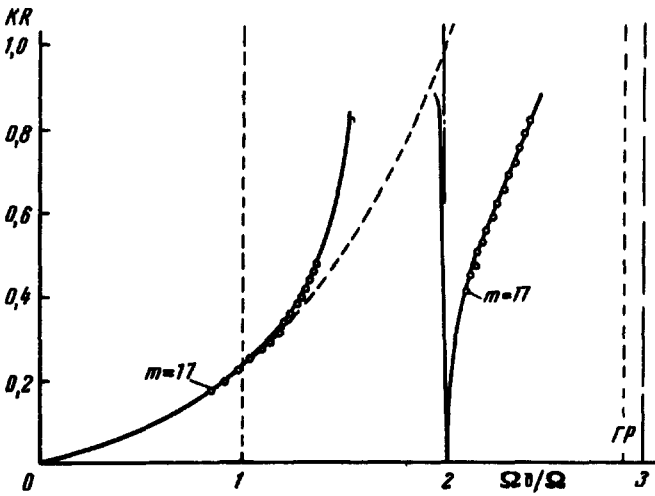


Рис.1. Спектр длинноволновых электромагнитных волн в висмуте при $H \parallel C_1, H \perp n \parallel C_3, F \perp H$. Сплошными линиями показан расчетный спектр, а точками – результаты эксперимента. Пунктирной линией схематически показан спектр "быстрой" магнитозвуковой волны при отсутствии пространственной дисперсии (ΓP – гибридный резонанс)

Рассмотрим асимптотическое ($KR \ll 1$) поведение тензора проводимости в скомпенсированном металле, помещенном в постоянное магнитное поле в случае, когда циклотронная масса дырок значительно превосходит циклотронную массу электронов. При напряженности постоянного магнитного поля, соответствующей первым дырочным резонансам для электронов, выполняется условие сильного магнитного поля ($\Omega_{эл} \gg \omega$) и нелокальные эффекты в электронной части проводимости малы. В дырочной части поперечной проводимости нелокальные эффекты играют существенную роль вблизи циклотронных резонансов, начи-

¹⁾ Аналогичные вопросы рассматривались в докладе Э.А.Канера и В.Г.Скобова на Советско-Японской конференции 1969 года в Новосибирске.

ная со второго. Вблизи первого дырочного резонанса локальная дырочная проводимость сильно возрастает и значительно превосходит электронную, но с уменьшением магнитного поля она быстро уменьшается и уже между первым и вторым резонансом вклад в локальную проводимость электронов в холловских членах превосходит вклад дырок. В результате, вблизи дырочных циклотронных резонансов, начиная со второго, создается ситуация отличная от имеющей место в обычных металлах.

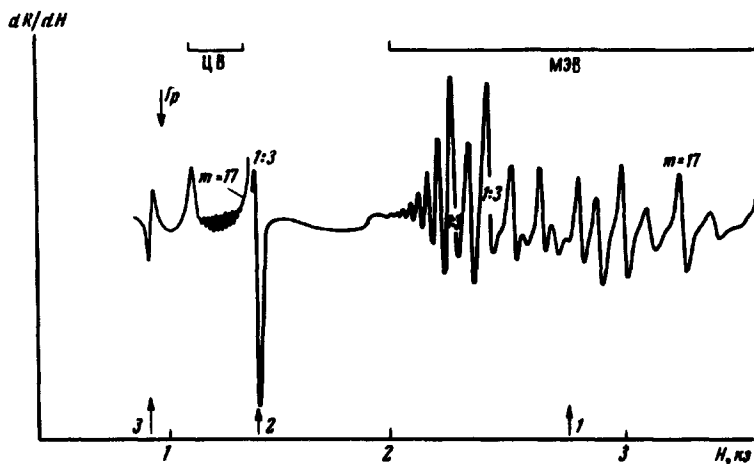


Рис.2. Стоячие электромагнитных волн в пластине висмута, наблюдаемые в эксперименте (ЦВ – циклотронная волна, МЗВ – "быстрая" магнитозвуковая волна. Стрелками внизу указано положение дырочных циклотронных резонансов и их номера)

Диэлектрическая проницаемость скомпенсированного металла в рассматриваемом случае положительна по обе стороны циклотронного резонанса с $n \geq 2$ и, следовательно, электронные волны вблизи дырочных циклотронных резонансов могут распространяться как со стороны сильных, так и со стороны слабых магнитных полей.

Помимо циклотронных волн в скомпенсированных металлах в окрестности циклотронных резонансов возможно распространение "быстрой" магнитозвуковой волны [1]. Если нелокальные эффекты в проводимости малы $(KR)^2 \ll \nu$, где ν – эффективная частота столкновений дырок, спектр этой волны должен оканчиваться на частоте гибридного резонанса. Учет нелокальных эффектов в случае $(KR)^2 \gg \nu$ приводит к тому, что спектр "быстрой" магнитозвуковой волны не доходит уже до частоты второго дырочного резонанса.

Спектр "быстрой" магнитозвуковой и циклотронных волн с поперечной поляризацией в окрестности второго дырочного резонанса в висмуте показан на рис.1. При получении спектра считалось, что направление постоянного магнитного поля, параллельно поверхности металла и совпадает с направлением бисекторной оси кристалла, а нормаль поверхности параллельна тригональной оси (в такой ситуации $M_1 / M_2 \sim 11$, где M_1, M_2 циклотронные массы дырок и электронов соответственно).

Экспериментальное исследование спектра электромагнитных волн в висмуте также производилось в описанной выше геометрии. Образец, представляющий собой плоско-параллельный монокристалл с нормалью к поверхности параллельной тригональной оси, помещался в прямоугольный резонатор с модой H_{102} . Частота внешнего электромагнитного поля составляла $3,6 \cdot 10^{10}$ гц.

Экспериментальная кривая зависимости производной поверхностного импеданса dR/dH от магнитного поля H при толщине образца $d = 90$ мк и температуре $1,5^\circ\text{K}$ приведена на рис.2. Точками на рис.1 показаны экспериментальные значения KR , которые были получены при условии, что первый наблюдаемый пик соответствует $m \equiv Kd/\pi = 17$. Как видно из рисунка, наблюдается хорошее не только качественное, но и количественное совпадение теоретических и экспериментальных данных.

В заключение авторы выражают благодарность Э.А.Канеру за полезное обсуждение результатов.

Донецкий
физико-технический институт
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
4 января 1971 г.

Литература

- [1] Э.А.Канер, В.Г.Скобов. ФТТ, 6, 1104, 1964.
- [2] W.M.Walsh, P.M.Platzman. Phys. Rev. Lett., 15, 784, 1965.
- [3] Д.Г.Ломинадзе, М.А.Савченко, К.Н.Степанов. ЖЭТФ, 53, 1296, 1967.
- [4] В.С.Эдельман. Письма в ЖЭТФ, 9, 302, 1969.
- [5] Н.Б.Бровцына, В.Г.Скобов. ЖЭТФ, 56, 694, 1969.