

05.2; 09

© 1992

УПРАВЛЯЕМОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ ЗАТУХАНИЕ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН В ФЕРРОМАГНИТНОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ $HgCr_2Se_4$

Н.И. Солин, И.Ю. Шумилов,
А.А. Самохвалов

Природа затухания магнитных волн в магнитных полупроводниках типа хромхалькогенидных шпинелей или халькогенидов европия в основном ясна. В непроводящих кристаллах затухание спиновых волн ΔH_k и ширина линии ферромагнитного резонанса обусловлены наличием примесей с сильной спин-орбитальной связью [1]. В проводящих кристаллах добавляется затухание, обусловленное джоулевыми потерями: колебания намагниченности возбуждают электрическое поле и поглощение в этом поле вследствие конечной электропроводности σ кристалла вызывает добавочное затухание. Известны два таких механизма: индукционный, где $\Delta H_k \sim \sigma \cdot k^2$ эффективный для малых значений волновых чисел k и магнитоэлектрический [2], где $\Delta H_k \sim k^2$, эффективный для спиновых волн с $K > 10^6 \text{ м}^{-1}$ [3]. Вклад магнитоэлектрического механизма впервые обнаружен [3] в кристаллах $HgCr_2Se_4$, где затухание спиновых волн зависит от напряженности E электрического поля при выполнении условий Черенкова. Вклад индукционного механизма хорошо исследован для случая однородной прецессии в ферритах [4] и в EuO [5]. Работ, посвященных влиянию электропроводности на затухание магнитоэлектрических волн (МСВ), нет. В то же время [6] сообщалось об увеличении прохождения МСВ в $HgCr_2Se_4$ в электрическом поле, где заведомо не выполняются условия Черенкова.

В этой работе мы приводим некоторые результаты исследований затухания МСВ и влияния на него электрического поля в проводящих кристаллах $HgCr_2Se_4$. Это соединение является ферромагнитным полупроводником с температурой Кюри $T_K = 106 \text{ К}$, имеет кристаллическую структуру нормальной шпинели, намагниченность насыщения $4\text{ПМ} = 4400 \text{ Гс}$ при $T = 0$. Электропроводность σ_0 исследованного кристалла до T_K имеет полупроводниковый ход, ниже T_K увеличивается \sim на 4 порядка и носителями являются электроны с холловской подвижностью $\mu = 48 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T = 77 \text{ К}$.

Полированная пластина с размерами $2.73 \times 1.18 \times 0.34 \text{ мм}^3$ из монокристалла $HgCr_2Se_4$ помещалась в пучность магнитного поля проходного прямоугольного резонатора H_{102} с частотой 9.43 ГГц (случай продольного намагничивания, причем $H \parallel E$, схема эксперимента и спектр описаны в [7]). Такая пластина представляет управляемый магнитным полем H магнитоэлектрический резонатор с резонансными условиями при $K_i = n_i \pi / l_i$, где $i \equiv x, y, z$, $n_i =$

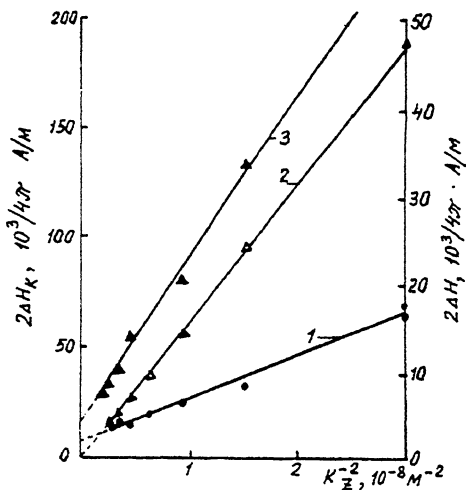


Рис. 1. Зависимость ширины линии МСВ от волнового числа k_z^{-2} .

число полуволн, укладывающихся на размер образца l_i , k_i – волновое число. Затухание МСВ определяет ширину линии МСВ, которая измерялась по стандартной методике. В [7] показано, что в такой структуре $HgCr_2Se_4$ распространяются объемные МСВ с $n_x = n_y = 1$, n_z – целое нечетное число, которое возрастает от H , и что спектр МСВ хорошо описывается теорией [8]. Во избежание эффектов нагрева, исследования проведены в импульсном режиме с импульсами длительностью 4 мкс и частотой повторения 16 Гц.

Обнаружено, что ΔH_K МСВ с известным k_z уменьшается с понижением температуры приблизительно пропорционально электропроводности образца. При фиксированной температуре ΔH_K уменьшается с увеличением k_z , пропорционально k_z^{-2} (рис. 1). В электрическом поле ΔH_K МСВ уменьшается, например, в поле с $E = 100$ кВ/м ΔH_K уменьшается в ~ 4 раза для всех мод при 55 К (рис. 1). Такое же сильное изменение $\Delta H_K(E)$ наблюдалось при 4.2 К и незначительное – при 77 К. Электропроводность на постоянном токе, измеренная 4-х контактным способом в импульсном режиме, сначала слабо зависит от E , а при $E \geq E_0 \approx 30$ кВ/м уменьшается, $\sigma \sim E^{-\alpha}$ с $\alpha = 1.5$ (рис. 2). Значение E_0 возрастает с повышением температуры, и при 77 К наблюдалась только слабое изменение σ от E .

Результаты с несомненностью показывают влияние индукционных потерь на ΔH_K МСВ $HgCr_2Se_4$. Вклад электропроводности в ширину линии однородной прецессии для тонкой пластины имеет вид [4]:

$$2\Delta H = 4\pi M \cdot \varepsilon'' \cdot \beta \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2. \quad (1)$$

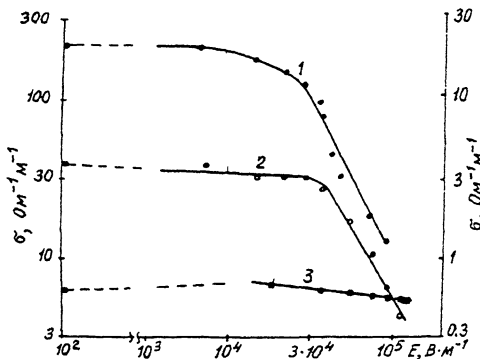


Рис. 2. Зависимость электропроводности на постоянном токе от напряженности электрического поля. 1 - 4.2 К, 2 - 55 К, 3 - 77 К.

Здесь d - толщина пластины, $\sigma = \omega \varepsilon''$, ε'' - диэлектрические потери, ω и λ - угловая частота и длина электромагнитной волны, $\beta \approx 0.1$ - постоянная. Можно ожидать, что для МСВ будет справедливо соотношение вида (1), где эффективным размером d является длина волны МСВ $\lambda_{МСВ} = \frac{\pi}{k_Z}$, если $\lambda_{МСВ} < d$. Оценки ε'' из наклона $\Delta H_k (K^{-2})$ дают значения $\beta \omega$, превышающие в ~ 2.5 раза значения σ_0 на постоянном токе при $E=0$ и $E \neq 0$ для исследованных температур. Это отличие может быть связано с приближенностью оценок (к примеру, в (1) значение $\beta = 0.04$), либо увеличением ε'' из-за вклада механизмов проводимости на переменном токе.

В магнитном поле σ_0 увеличивается (при 77 К, например, в ~ 4 раза при $H = 1.4$ Тл), причем в основном увеличивается концентрация носителей, а подвижность увеличивается в меньшей степени. При 77 К получено:

$$M(H) = M(H=0) \left[1 + \frac{M_B H}{k T_0} \right] \quad (2)$$

с $T_0 \approx 7$ К ≈ 5 Тл (M_B - магнетон Бора, k - постоянная Больцмана). По предварительным данным, при 77 К уменьшение σ_0 в сильном электрическом поле происходит в основном из-за уменьшения подвижности.

Джоулевый нагрев ΔT значителен только при 4.2 К, где $\Delta T \approx 20$ К (при 56 К и 77 К $\Delta T \leq 1$ К) и ответственен только за малую часть $\sigma(E)$. Природа электропроводности $HgCr_2Se_4$ хорошо объясняется в рамках теории разогрева магненов горячими

носителями заряда [9]. В $HgCr_2Se_4$ температура Дебая меньше T_K , поэтому связь магнонов с фононами аномально слабая. И магноны, как и электроны, в электрическом поле разогреваются. Нагрев электронов в $HgCr_2Se_4$ исследован в [10] измерениями температуры шумов. Если электроны передают импульс магнонам, а энергию — фононам, тогда подвижность должна меняться от H по зависимости типа (2), а электропроводность при $E > E_0$ должна уменьшаться из-за уменьшения подвижности $\sigma \sim E^{-\alpha}$ $\alpha = 5/4$ [9]. По оценкам [9], для типичных магнитных полупроводников значения $T_0 = 10$ К и $E_0 = 100$ кВ/м и близки к наблюдаемым на эксперименте значениям. Наблюдаемые ниже T_K зависимости σ_0 от T и H обусловлены в основном изменениями концентрации носителей из-за красного сдвига дна зоны проводимости, пропорционального изменению намагниченности. Нагрев магнонов в электрическом поле должен вызвать также уменьшение концентрации носителей, что объясняет большее значение экспериментальной величины $\alpha \approx 1.5$ от теоретической. Кроме того, с уменьшением концентрации носителей нагрев магнонов от E должен уменьшаться [9], что согласуется с обнаруженным увеличением E_0 от температуры.

Таким образом, затухание МСВ обусловлено электропроводностью кристалла, зависимости которой от температуры, магнитного, электрического полей объясняются сильным взаимодействием магнитной и электронной подсистем в $HgCrSe$.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Анисимов А.Н., Гуревич А.Г., Эмирян М.Л. // ЖЭТФ. 1983. Т. 84. С. 677.
- [2] Нагаев Э.Л. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 45. С. 127-129.
- [3] Солин Н.И., Ауслендер М.И., Шумилов И.Ю., Самохвалов А.А. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 8. С. 2240-2246; // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. № 12. С. 223-233.
- [4] Maryskom M. // Phys. Stat. Sol. (a). 1978. V.47. С.277.
- [5] Солин Н.И., Самохвалов А.А. // ФТТ. 1977. Т. 19. № 2. С. 645-647; // ФТТ. 1978. Т. 20. № 8. С. 1910-1912.
- [6] Виглин Н.А., Осипов В.В., Самохвалов А.А. // ФТТ. 1991. Т. 33. С. 2695.
- [7] Солин Н.И., Шумилов И.Ю., Самохвалов А.А. // ЖТФ. 1987. Т. 57. С. 2250.
- [8] Калинин Б.А., Митева С.И. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1980. Т. 23. № 5. С. 74-75.
- [9] Korenbliit Ya., Samokhvalov A.A., Osipov V.V. // Sov. Sci. Rev. A. Phys. 1987. V. 8. P. 447-517.

[10] Г а л ь д и к а с А.П., М а т у л е н е н е И.Б. и др. // ФТТ. 1983. Т. 25. № 7. С. 1999.

Институт физики металлов
Уро РАН, Екатеринбург

Поступило в Редакцию
18 мая 1992 г.