

УСИЛЕНИЕ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ И СПИНОВЫХ ВОЛН ДРЕЙФУЮЩИМИ НОСИТЕЛЯМИ ЗАРЯДА В МАГНИТНОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ HgCr_2Se_4

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

Впервые в магнитном полупроводнике HgCr_2Se_4 обнаружено уменьшение затухания магнитостатических и спиновых волн в электрическом поле. Результаты объясняются разогревом и усилением спиновых волн дрейфующими носителями заряда.

Проблема взаимодействия носителей заряда с магнитными волнами является одной из актуальных в физике магнитных полупроводников. Имеются два основных механизма взаимодействия, а именно — s - d -обменное взаимодействие Вонсовского и релятивистское взаимодействие тока электронов с полем спиновой волны^{1, 2}. Согласно теории, эти взаимодействия могут приводить к новым явлениям, например, к усилению и разогреву магнонов носителями заряда^{3, 4}. Разогрев магнонов горячими носителями заряда был обнаружен и исследован экспериментально в магнитных полупроводниках EuO , CdCr_2Se_4 , HgCr_2Se_4 ⁵⁻⁷.

В настоящей работе исследовано влияние электрического поля на затухание спиновых волн, возбуждаемых методом поперечной накачки⁸ в ферромагнитном полупроводнике HgCr_2Se_4 . Монокристаллические пластины с размерами $\sim 1 \times 0,7 \times 0,2$ мм³ имели электропроводность $\sigma = 1 - 10^{-3}$ Ом⁻¹ · см⁻¹ и подвижность носителей заряда $\mu = 10 - 200$ см² · В⁻¹ · с⁻¹ при температуре $T = 77$ К. В условиях эксперимента по ферромагнитному резонансу (ФМР) при высоких уровнях сверхвысокочастотной мощности ($P_{\text{свч}} \cong 10$ Вт) в пластине в зависимости от напряженности постоянного магнитного поля H наблюдался спектр линий поглощения, обусловленный возбуждением стоячих магнитостатических волн (МСВ). Пороговое СВЧ магнитное поле h возбуждения спиновых волн определялось из экстремальной зависимости резонансной ($H = H_{\text{рез}}$) магнитной проницаемости μ'' основной моды МСВ, соответствующей ФМР в пластине, как функции h^{-1} . Измерения μ'' и h проведены методом⁹, при котором СВЧ мощность на выходе проходного резонатора поддерживается постоянной при помощи прецизионных аттенуаторов. Ширина линии поглощения ΔH_0 определялась методом¹⁰ при малых h ниже порога возбуждения спиновых волн. В условиях резонанса на образец подавалось постоянное электрическое поле вдоль направления H . Во избежание нагрева измерения проведены в импульсном (длительности электрического и СВЧ импульсов ~ 1 мкс) режиме путем стробирования. Исследования проведены на частоте 9,4 ГГц при температуре $T = 77$ К.

На рис. 1 приведены типичные зависимости $\mu'' = f(h^{-1})$, измеренные для основной моды МСВ при различной напряженности электрического поля E . Согласно теории⁸, наблюдаемое уменьшение μ'' от h^{-1} обусловлено нестабильным ростом спиновых волн с частотой накачки, направленных вдоль магнитного поля и имеющих значения волнового вектора $k \cong \cong \sqrt{4\pi M/D} \approx 10^6$ см⁻¹ для HgCr_2Se_4 . Здесь M — намагниченность насыщения, D — постоян-

ная неоднородного обмена. Из выражения для порогового поля $h_{\text{пор}} \sim \Delta H_0 \sqrt{\Delta H_k}$ можно оценить изменение параметра затухания спиновых волн ΔH_k в зависимости от напряженности электрического поля.

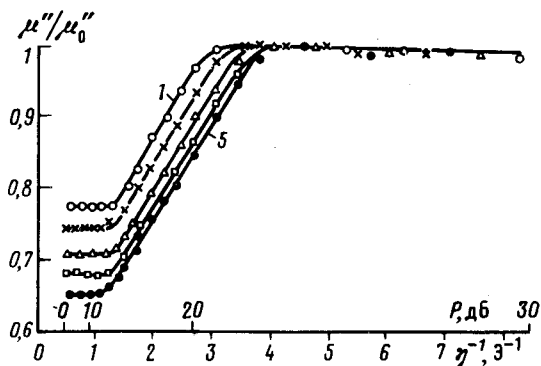


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость резонансной магнитной проницаемости образца 1 от напряженности СВЧ магнитного поля. Кривые 1 – 5 при напряженности электрического поля $E = 0; 0,7; 1,4; 2,1; 2,8 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$, соответственно. Для образца 1: $\sigma = 0,08 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $\mu \cong 50 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$

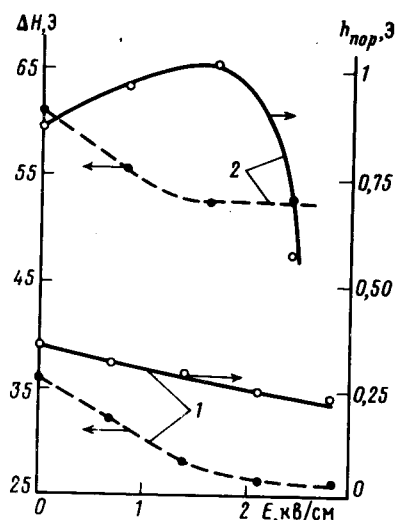


Рис. 2

Рис. 2. Зависимости порогового поля возбуждения спиновых волн (сплошные кривые) и ширины линии основной моды МСВ (пунктирные кривые) от напряженности электрического поля для образцов 1 и 2. Для образца 2: $\sigma = 0,2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $\mu \cong 200 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$

Из рис. 2 видно, что ширина линии поглощения основной моды МСВ в зависимости от E уменьшается в 1,1 – 1,2 раза, причем основное уменьшение ΔH_0 происходит при $E \leq 1,5 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$. Видно также, что для образцов 1 и 2 зависимости $h_{\text{пор}}$ от E имеют разный характер. Например, для образца 2 $h_{\text{пор}}$ в зависимости от E сначала возрастает; а потом уменьшается почти в два раза. Наблюдаемое изменение $h_{\text{пор}} = f(E)$ не может быть объяснено только уменьшением ΔH_0 . Из экспериментальных результатов следует, что в поле с $E = 3 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$ ΔH_k уменьшается в 1,2 раза для образца 1 и в 2,2 раза ($\sim 25 - 30 \text{ дБ} \cdot \text{см}^{-1}$) для образца 2. Влияние электрического поля на затухание спиновых волн не обнаружено на образцах с меньшей подвижностью, а также с σ , отличающейся на порядок от σ образцов 1 и 2.

Наблюдаемое уменьшение ΔH_0 МСВ можно объяснить разогревом магновов горячими носителями при предположении, что магноны с малыми k , определяющие величину ΔH_0 , нагреваются носителями заряда сильнее, чем вся магنونная система в целом. В пользу такой модели говорит факт, что наблюдаемое уменьшение ΔH_0 от E соответствует повышению температуры на 20 – 30 К, как это следует из температурной зависимости ΔH_0 . (Заметим, что обычный джоулевый нагрев образца не превышал 1 – 1,5 К). При этом намагниченность, определенная из $H_{\text{рез}}$ практически от E не меняется. Предположение о более сильном нагреве магновов с малыми k согласуется с экспериментом по магнитным шумам в HgCr_2Se_4 ¹¹, из которого следует, что температура магнитного излучения при ФМР выше, чем вне резонанса.

Уменьшение затухания спиновых волн в электрическом поле может быть объяснено черенковской генерацией спиновых волн дрейфующими носителями заряда, поскольку в нашем случае дрейфовая скорость носителей заряда ($\leq 5 \cdot 10^5 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$) превышает фазовую скорость возбуждаемых спиновых волн ($\cong 5 \cdot 10^4 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$). Однако оценки по работе ¹² уменьшения ΔH_k для условий нашего эксперимента дают значительно меньшую величину, чем обнаружено на эксперименте. Возможно это связано с неравновесностью горячих электронов, магновов и фононов в нашем случае.

Можно также предположить, что наблюдаемое уменьшение магнитных потерь обусловлено изменением дифференциальной проводимости магнитного полупроводника. Такая возможность ранее была обоснована для поверхностной МСВ в слоистой структуре феррит — полупроводник¹³. В связи с этим нами обнаружено, что электропроводность HgCr_2Se_4 в сильном электрическом поле уменьшается и имеет минимум при $E \cong 1,5 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$.

Заметим, что в¹⁴ особенности изменения намагниченности HgCr_2Se_4 $f(E)$ также объяснены усилением спиновых волн носителями заряда.

Таким образом, обнаружено уменьшение затухания магнитостатических и спиновых волн в магнитном полупроводнике в электрическом поле.

Авторы благодарны А.Б.Зологовицкому и М.И.Ауслендеру за обсуждения работы.

Литература

1. *Вонсовский С.В.* ЖЭТФ, 1946, 16, 981.
2. *Туров Е.А.* Сб. "Ферромагнитный резонанс", М.: ГИФМЛ, 1961, гл. 5, § 6.
3. *Ахизер А.И., Барьяхтар В.Г., Пелетминский С.В.* ЖЭТФ, 1963, 45, 337.
4. *Коренблит И.Я., Танцилевич Б.Т.* ФТТ, 1976, 18, 62.
5. *Солн Н.И., Самохвалов А.А., Калинин В.Т.* ФТТ, 1976, 18, 2104.
6. *Самохвалов А.А., Осипов В.В., Калинин В.Т.* Письма в ЖЭТФ, 1978, 28, 413.
7. *Samokhvalov A.A., Osipov V.V., Solin N.I., Gunichev A.F., Korenblit I.A., Galdikas A.P.* JMMM, 1984, 46, 191.
8. *Suhl H.* J. Phys. Chem. Sol., 1957, 1, 209.
9. *Weiss M.T.* J. Appl. Phys., 1960, 31, 778.
10. *Яковлев Ю.М., Бурдин Ю.И., Шильников Ю.Р.* Известия высш. уч. зав., серия, Радиоэлектроника, 1968, 11, 834.
11. *Гальдикас А.П., Магүлене И.Б., Самохвалов А.А., Осипов В.В.* ФТТ, 1983, 25, 1999.
12. *Coutinho Filho M.D., Miranda I.C.M., Resende S.M.* Phys. Stat. Sol. (b), 1973, 57, 85.
13. *Беспятых Ю.И., Зильберман П.Е., Зубков В.И.* Письма в ЖТФ, 1977, 3, 568.
14. *Осипов В.В., Самохвалов А.А., Костылев В.А., Симонова М.И.* ФТТ, 1986, 28, 188.

Поступила в редакцию

6 июля 1986 г.

После переработки

9 октября 1986 г.