

ВОЗБУЖДЕНИЕ СПИНОВЫХ ВОЛН НОСИТЕЛЯМИ ТОКА В МАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ EuO и CdCr_2Se_4

А.А.Самохвалов, В.В.Осипов, В.Т.Калинников,
Т.Г.Аминов

Исследовано уменьшение намагниченности и электропроводности магнитных полупроводников EuO и CdCr_2Se_4 в сильном электрическом поле, связанное с возбуждением спиновых волн носителями тока.

Высокая подвижность носителей тока и малое затухание спиновых волн в EuO и CdCr_2Se_4 делают эти магнитные полупроводники благоприятным объектом для исследований электрон-магнитного взаимодействия. Это взаимодействие может приводить к новым явлениям — разогреву, усилению или черенковской генерации спиновых волн достаточно быстрыми носителями тока [1,2]. Макроскопически это должно проявляться в изменении физических свойств магнитных полупроводников в сильном электрическом поле [3 — 5]. В настоящей работе исследуется прямое следствие возбуждения спиновых волн носителями тока, а именно — уменьшение намагниченности EuO и CdCr_2Se_4 в сильном электрическом поле E .

Измерения проведены в температурной области 20 — 300 К на монокристаллах EuO ($T \approx 70$ К) и $\text{Cd}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$ ($T \approx 130$ К) с достаточно высокой электропроводностью ($\gtrsim 10^{14}$ ом $^{-1}$ · см $^{-1}$ при температуре измерений). Для уменьшения джоулева нагрева применялась импульсная методика электрических полей с прямоугольными импульсами длительностью от 5 до 50 мксек и частотой повторения 1 — 10 гц. Уменьшение намагниченности при подаче на образец электрического импульса измерялось индукционным путем с помощью скомпенсированных (для уменьшения наводок) катушек. Намагниченный образец создавал в катушках магнитный поток. При изменении намагниченности M во время электрического импульса на катушках индуцировался импульс, пропорциональный dM/dt . Изменение намагниченности ΔM определялось интегрированием dM/dt .

Типичный результат измерений dM/dt и $\Delta M/M_s$ (M_s — намагниченность насыщения при 0 К) в зависимости от E для EuO (образец 1) при 20° приведен на рис. 1. При $E \gtrsim 3$ кВ · см $^{-1}$ импульсы dM/dt уже не прямоугольны, что соответствует нелинейному уменьшению намагниченности со временем. Одновременно при $E \gtrsim 3$ кВ · см $^{-1}$ начинается уменьшение электропроводности во время действия электрического поля — импульсы тока также становятся непрямоугольными. Для ряда образцов электропроводность за время действия электрического импульса уменьшалась более, чем на порядок и вольт-амперная характеристика (ВАХ) по заднему фронту токового импульса имела N -образный вид. Из-за большого времени релаксации намагниченности после электричес-

кого импульса соответствующий сигнал dM/dt был мал, что затрудняло измерение этого времени. Однако соответствующие времена релаксаций проводимости, связанные, очевидно, с релаксациями намагниченности, составляли $10^{-3} - 10^{-4}$ сек. Этот результат соответствует большим временам магнон-фононных релаксаций (в соответствии с теорией [2]) и является следствием слабой связи магнонной и фононной систем в ферромагнитных полупроводниках с низкой температурой Кюри. Аналогичный результат для $\frac{\Delta M}{M_s}(E)$ был получен для CdCr_2Se_4 .

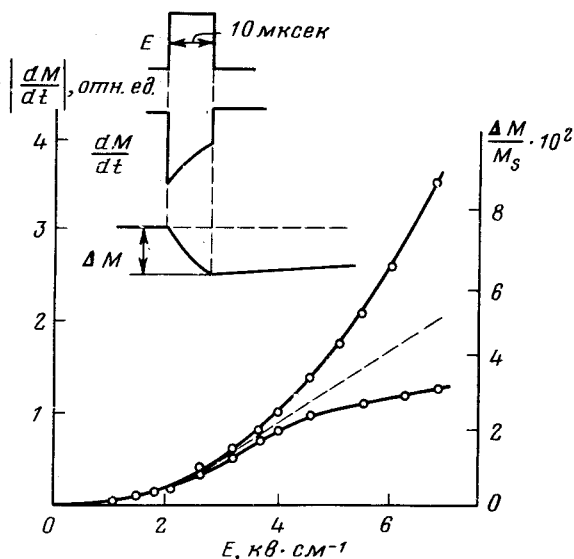


Рис.1. Зависимость dM/dt от E (сплошные линии) для EuO (образец 1). Верхняя линия построена по переднему фронту импульсов dM/dt , нижняя — по заднему. Пунктирная линия — зависимость $\Delta M/M_s$ от E . Вверху схематически изображены импульсы E , dM/dt и изменение намагниченности M со временем

На рис.2 и рис.3 приведены температурные зависимости $\Delta M/M_s$ для EuO (образец 2) и $\text{Cd}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$ (образец 3), измеренные при фиксированных E . Величина $\Delta M/M_s \approx 10^{-2}$ для EuO (образец 2) меньше, чем для EuO (образец 1) из-за меньшей концентрации носителей тока в образце 2. Температурные зависимости $\Delta M/M_s$ коррелируют с температурными зависимостями подвижности носителей тока для обоих магнитных полупроводников. Для EuO $\frac{\Delta M}{M_s}$, как и подвижность, быстро уменьшается при повышении температуры от 20 до 40 К, а для $\text{Cd}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$, наоборот, как и подвижность, сильно растет от 77 К при повышении температуры до температуры Кюри, а затем быстро исчезает. Можно констатировать, что уменьшение намагниченности в сильном электрическом поле в EuO и CdCr_2Se_4 имеет место только при достаточно высокой подвижности и концентрации носителей тока.

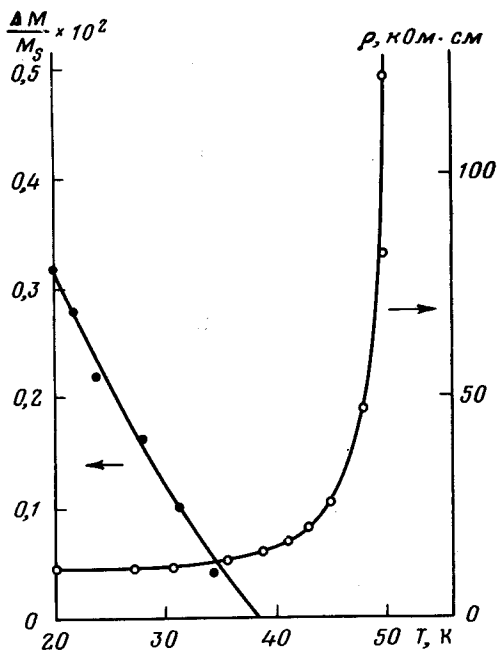


Рис. 2. Температурные зависимости $\Delta M/M_s$ и ρ для EuO (образец 2) при $E = 7 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$

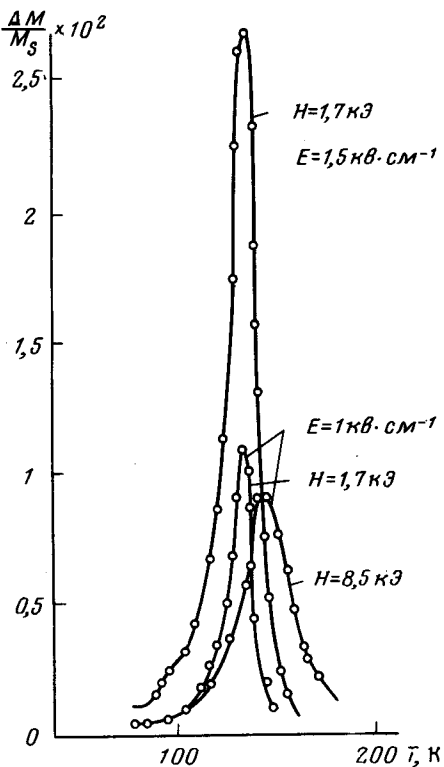


Рис. 3. Температурные зависимости $\Delta M/M_s$ для CdCr_2Se_4 (образец 3) при разной напряженности электрического и магнитного полей

Приведенные результаты для $\Delta M / M_s = f(E, T)$ не могут быть объяснены джоулевым нагревом образца электрическим импульсом. Как правило, величина $\Delta M / M_s$ была больше, чем рассчитанная для адиабатического нагрева током. Подтверждением нетепловой природы $\Delta M / M_s$ может служить сопоставление температурных зависимостей $\Delta M / M_s$ и электросопротивления для EuO (образец 2) (рис.2). В области 20 – 35 К $\rho(T) = \text{const}$, и следовательно, при постоянной энергии импульса ($E = \text{const}$) и при джоулевом нагреве образца $\Delta M / M_s$ должна была бы расти при повышении температуры (так как наклон $\Delta M / \Delta T$ растет при этом), однако $\Delta M / M_s$ сильно уменьшается, очевидно, из-за уменьшения подвижности в этой температурной области. Следует отметить, что в ряде случаев измеренная $\Delta M / M_s$ была в несколько раз меньше, чем рассчитанная по энергии импульса для адиабатического случая. Такая ситуация может быть объяснена менее благоприятными (для некоторых образцов) условиями нагрева магнетонной системы носителями тока из-за их малой подвижности и (или) концентрации. Как было отмечено выше, времена магнетон-фононных релаксаций (до $10^{-4} - 10^{-3}$ сек) в магнитных полупроводниках EuO и CdCr_2Se_4 велики по сравнению с временами релаксаций внутри магнетонной и фононной систем и с длительностью импульсов электрического поля ($\sim 10^{-5}$ сек). Поэтому разогрев магнетонов и фононов носителями тока происходит независимо и с разной степенью интенсивности в зависимости от параметров магнитного полупроводника, например, от подвижности носителей тока, теплоемкостей подсистем и других. Это и может обусловить малую, однако не связанную с джоулевым нагревом величину $\Delta M / M_s$, наблюдаемую для некоторых образцов. В этом случае после электрического импульса температура решетки может оказаться выше температуры спиновой системы с последующим установлением теплового равновесия между ними за время $10^{-3} - 10^{-4}$ сек.

Институт физики металлов
Академии наук СССР
УНЦ

Поступила в редакцию
8 августа 1978 г.

Литература

- [1] А.И.Ахиезер, В.Г.Барьяхтар, С.В.Пелетминский. ЖЭТФ, **45**, 337, 1963.
- [2] И.Я.Коренблит, Б.Г.Танхилевич. ФТТ, **18**, 62, 1976.
- [3] А.А.Самохвалов, В.В.Осипов, В.Т.Калинников, Т.Г.Аминов. ФТТ, **20**, 595, 1978.
- [4] I.Balberg, U.L.Pinch. Phys. Rev. Lett., **28**, 909, 1972.
- [5] Н.И.Солин, А.А.Самохвалов, В.Т.Калинников. ФТТ, **18**, 2104, 1976.