

УСИЛЕНИЕ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН В ФЕРРОМАГНИТНОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ HgCr_2Se_4 В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В. А. Костылев, А. А. Самохвалов, Н. А. Виглин, Н. М. Чеботаев

Исследовано влияние электрического поля на прохождение магнитостатических волн в ферромагнитном полупроводнике HgCr_2Se_4 с электронным типом проводимости. Установлено, что при увеличении электрического поля мощность магнитостатических волн возрастает пропорционально току, текущему через образец. Анализ всех возможных причин обнаруженного усиления магнитостатических волн не позволяет сделать однозначный вывод о его природе.

Одной из актуальных задач твердотельной СВЧ-электроники является создание приборов, способных усиливать магнитостатические волны (МСВ). В основу работы таких приборов может быть, в частности, положено усиление МСВ потоком дрейфующих носителей заряда [1]. Традиционный путь реализации подобной идеи — это слоистые структуры, в которых в качестве магнитной среды обычно используют пленку ЖИГ, а плазменной — различные полупроводники (см., например, [2]). Мы попытались реализовать идею усиления МСВ, используя в качестве объекта магнитный полупроводник [3]. Исходным материалом для этих целей был выбран ферромагнитный полупроводник — хромхалькогенидная шпинель HgCr_2Se_4 . Это соединение обладает сравнительно малым затуханием магнитостатических волн ($2\Delta H \sim 2$ Э) и имеет рекордную для данного класса соединений подвижность носителей заряда (до $1000 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ при 4.2 К [4, 5]). Кроме того, в [6, 7] на этом соединении были получены положительные результаты по усилению спиновых волн с $K \sim 10^5 \div 10^6 \text{ см}^{-1}$ при выполнении условия Черенкова.

§1. Методика эксперимента

Исследуемые монокристаллические образцы HgCr_2Se_4 были в форме прямоугольных пластинок размерами до $3 \times 0.5 \times 0.1$ мм и обладали n -типом проводимости. Образец располагался в криостате таким образом, что его плоскость была расположена перпендикулярно направлению магнитного поля, тем самым возбуждались прямые объемные МСВ (ПОМСВ). Сверхвысокочастотные колебания 8526 МГц подавались по коаксиальному кабелю на короткозамкнутую передающую антенну, которая имела диаметр 30 мкм и лежала на поверхности образца перпендикулярно направлению тока. Сигнал с приемной короткозамкнутой антенны, расположенной параллельно передающей, подавался на квадратичный детектор, широкополосный усилитель, стробоскопический вольтметр, который мог работать в режиме синхронного детектора, и далее записывался на двухкоординатном самописце как функция магнитного поля. Первоначально спектр МСВ записывался без электрического поля. Колебания МСВ, модулированные частотой 1 кГц, измерялись стробоскопическим вольтметром, работающим в режиме синхронного детектирования. Затем модуляция отключалась и на образец подавались импульсы электрического поля дли-

тельностью от 5 до 10 мкс с частотой следования ≤ 25 Гц. В этом случае сигнал МСВ измерялся стробоскопическим вольтметром. Стробоскопический вольтметр измеряет разность напряжений перед импульсом и в любой точке на импульсе или за ним. Следовательно, если при подаче импульса электрического поля прохождение МСВ не изменится, то на выходе вольтметра напряжение будет равно нулю. В [8, 9] уже были рассмотрены различные механизмы, приводящие к изменению прохождения МСВ. Если за время действия импульса намагниченность образца изменится, то на самописце будет записана дифференциальная кривая, сме-

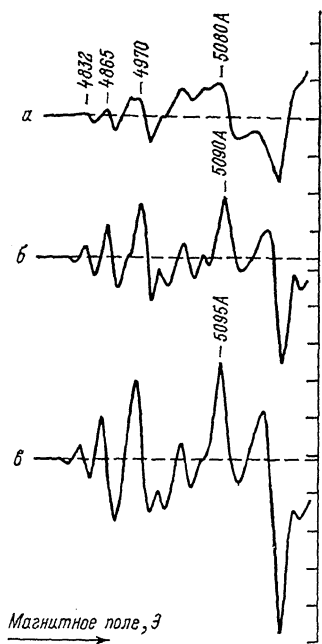


Рис. 1. Спектр ПОМСВ в HgCr_2Se_4 при $T=4$ (а), 20 (б) и 35 К (в).

Вертикальная шкала — мощность, одно деление равно 0.3 мВт. Числа над пиками — метки магнитного поля в эрстедах.

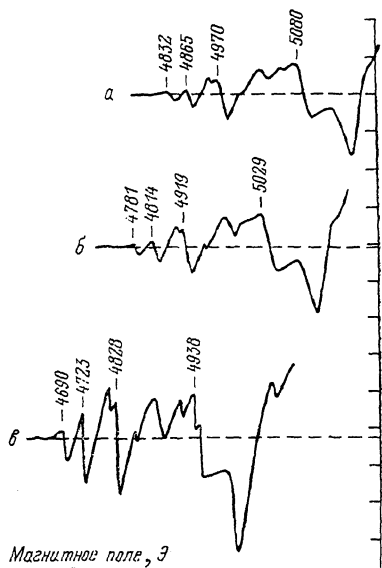


Рис. 2. Спектр ПОМСВ при $T=4$ К в электрических полях $E \approx 0$ (а), 1.5 (б) и 2.5 $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ (в) (при $E=0$ спектр снят по модуляционной методике).

щенная относительно спектра МСВ, записанного без электрического поля. Если прохождение МСВ во время действия импульса ухудшится, то полученная кривая зеркально отображает спектр МСВ, а если улучшится, то результирующая кривая будет повторять спектр МСВ (данная кривая полностью совпадает со спектральной кривой, записанной по модуляционной методике, при увеличении мощности МСВ в два раза). Однако в этих работах не была полностью решена проблема создания омических контактов и отвода джоулева тепла, что могло приводить к неоднородному по объему разогреву образца. Эта проблема была нами решена путем теплового контакта образца с подложкой из лейкосапфира и изготовления омических контактов из индия. Для точной количественной оценки мощности усиленных МСВ были определены коэффициенты стоячей волны (КСВН) передающей и приемной антенны, затухания СВЧ сигнала в кабелях и на разъемах. Было установлено, что КСВН во время подачи импульса электрического поля не меняется. С учетом КСВН и затуханий мощность СВЧ сигнала, подводимого к передающей антенне, равнялась 2.8—3.2 мВт. Часть этой мощности теряется в виде излучения, другая часть просачивается на приемную антенну, третья — преобразуется в МСВ. Просачиваемая СВЧ мощность не зависит ни от магнитного, ни от электрического полей и равна ~ 0.5 мВт. Она также практически не зависит от температуры в области магнитного упорядочения ($T \leq 110$ К).

2. Экспериментальные результаты

На рис. 1 приведен спектр ПОМСВ, снятый при различных температурах. Видно, что при повышении температуры амплитуда пиков МСВ существенно возрастает и весь спектр сдвигается в сторону меньших магнитных полей. Это явление объясняется тем, что при повышении температуры электросопротивление образца возрастает, а намагниченность уменьшается. Рост электросопротивления приводит к уменьшению электромагнитных потерь МСВ.

На рис. 2 приведен тот же спектр ПОМСВ, записанный при различных значениях электрического поля ($T=4$ К). Можно отметить, что амплитуда пиков МСВ в электрическом поле существенно возрастает пропорционально текущему через образец току и не зависит от полярности напряжения (рис. 3). При этом спектр МСВ воспроизводит исходный, сдвинутый по

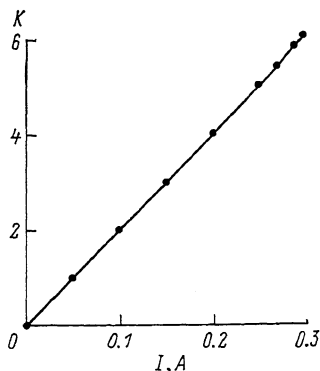


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления МСВ от тока, текущего через образец при $T=4$ К.

Коэффициент равен отношению амплитуд пика МСВ, отмеченного буквой А (рис. 2), в электрическом поле и без поля.

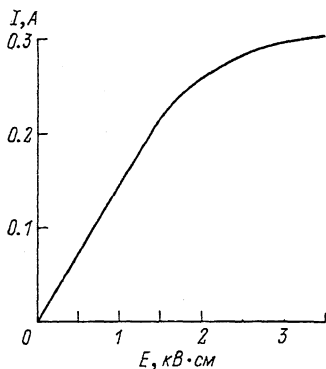


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика HgCr_2Se_4 при $T=4$ К.

сравнению с ним в сторону больших магнитных полей, что в соответствии с температурной зависимостью могло бы означать возможное увеличение намагниченности образца. Например, пик МСВ исходного спектра, отмеченный буквой А, соответствует магнитному полю 5080 Э, а в электрическом поле — 5100 Э. Важно отметить, что смещение спектра МСВ в сторону больших магнитных полей происходит при 4 К, когда намагниченность образца уже практически не зависит от температуры. Увеличение мощности МСВ в электрическом поле можно было бы объяснить простой причиной — джоулевым нагревом образца во время действия импульса электрического поля. Однако при нагреве образца спектр МСВ смещался бы в область меньших магнитных полей, что противоречит полученному результату (рис. 2). Другим доказательством отсутствия нагрева образца являются вольт-амперные характеристики (рис. 4). Линейная зависимость вольт-амперных характеристик до $E \approx 2.5$ кВ·см⁻¹ означает, что нагрев образца отсутствует. При $E > 2.5$ кВ·см⁻¹ вольт-амперные характеристики имеют N-образный вид, что могло бы служить доказательством теплового нагрева образца. Для этого случая в соответствии с температурной зависимостью спектров ПОМСВ наибольшие изменения в прохождении МСВ должны были бы наблюдаться на N-образном участке вольт-амперной характеристики, тогда как в действительности на этом участке мощность МСВ не меняется (рис. 3).

При увеличении электрического поля до 3.5 кВ·см⁻¹ мощность пика А возрастает с 0.3 до 1.8 мВт. К сожалению, мы не знаем, какая часть мощности, подводимая к передающей антенне, теряется в виде излучения. Излучение существенным образом зависит от длины и геометрии антенны.

Если теряемая мощность составляет более 20 % от подводимой, то достигнутый коэффициент усиления МСВ > 1 , а если меньше, то полученный результат соответствует частичной компенсации потерь.

Значительные изменения в прохождении МСВ возникают во время действия импульса электрического поля и за ним (рис. 5). Эти изменения можно разделить на две части: безынерционную и инерционную. Безынерционный отклик возникает во время действия импульса электрического поля и воспроизводит его форму. Его можно выделить путем стробирования изменений в прохождении МСВ по переднему фронту импульса. Инерционный отклик выделяется путем стробирования изменений в прохождении МСВ за импульсом электрического поля. При этом вид спектра ПОМСВ точно такой же, как и во время действия импульса электрического поля (рис. 2), а коэффициент усиления уменьшается со временем. Время релаксации инерционного отклика $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ с и не зависит от температуры.

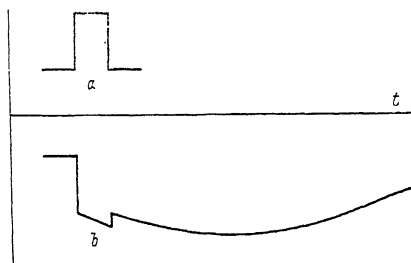


Рис. 5. Схематическая временная развертка импульса электрического поля и сигнала с СВЧ детектора во время прохождения МСВ.

3. Обсуждение результатов

Увеличение мощности МСВ во время действия импульса электрического поля и после него пропорционально текущему через образец току; сдвиг всего спектра в сторону больших магнитных полей — трудно объяснимый результат. Возможные механизмы усиления МСВ в электрических полях зависят существенным образом от плазменных параметров магнитного полупроводника, температуры, волнового вектора k МСВ и выполнения условия Черенкова [3]. Так, например, механизм, связанный с разогревом и генерацией магнонов [10], нашего результата не объясняет, поскольку сдвиг спектра МСВ происходил бы в сторону меньших магнитных полей. Черенковский механизм усиления МСВ имеет пороговый характер. Возможным объяснением результата могла бы быть стимулированная электрическим полем генерация спиновых волн в магнитном полупроводнике с парамагнитными примесями (ионами Cr^{+2} и Cr^{+4} в нашем случае) [11, 12]. Подобный механизм, вероятно, объяснял бы отмеченное возможное увеличение намагниченности образца. Действительно, возбуждение носителей заряда на уровни магнитных ионов Cr^{+2} и Cr^{+4} должно сопровождаться изменением величины спинов этих ионов. Однако этот механизм, так же как и черенковский, имеет пороговый характер. Следовало бы также иметь в виду и возможную причину методического характера, в частности изменение условий распространения МСВ за счет протекающего через образец тока, создающего неоднородное магнитное поле, и возможную при этом фокусировку или расфокусировку МСВ [2]. Однако подобной причиной невозможно объяснить усиление МСВ за импульсом электрического поля. Наконец, на прохождении МСВ через магнитный полупроводник в электрическом поле может влиять изменение его физических параметров (за счет разогрева магнонов носителями заряда [10]), в частности уменьшение электропроводности и соответствующее уменьшение СВЧ потерь. Сравнивая спектры ПОМСВ, полученные при различных температурах без электрического поля со спектрами ПОМСВ в электрическом поле, можно

заклЮчить, что подобное объяснение также является неверным. Анализ всех возможных причин обнаруженного усиления не позволяет пока прийти к однозначному выводу о его природе.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. При увеличении электрического поля мощность пиков МСВ возрастает пропорционально току.

2. В электрическом поле весь спектр ПОМСВ смещается в сторону больших магнитных полей.

3. Изменения в прохождении ПОМСВ возникают во время действия импульса электрического поля и за ним и не зависят от его полярности.

4. Анализ всех возможных причин обнаруженного усиления ПОМСВ не позволяет сделать однозначный вывод о его природе.

Список литературы

- [1] Ахвезер А. И., Барьяхтар В. Г., Пелетминский С. В. Спиновые волны. М.; Л.: Наука, 1972.
- [2] Вапковский А. В., Лебедев Б. М., Зубков В. И., Беспятовых Ю. И. // Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. 1979. В. 6 (620). С. 46.
- [3] Лебедев Б. М., Лопатин В. П. // Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. 1978. В. 12 (564). С. 37.
- [4] Виглин Н. А., Самохвалов А. А., Солин Н. И., Симонова М. И. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 4. С. 1230.
- [5] Selmi A., Mauger A., Meritier M. // J. of magnetism and magnetic materials. 1987. V. 66. P. 295—316.
- [6] Солин Н. И., Самохвалов А. А., Шумилов И. Ю. // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 44. № 10. С. 406—409.
- [7] Солин Н. И., Самохвалов А. А., Шумилов И. Ю., Ауслендер М. И. // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. № 12. С. 223—233.
- [8] Осипов В. В., Виглин Н. А., Чеботаев Н. М., Самохвалов А. А., Костылев В. А. // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 3. С. 113—118.
- [9] Виглин Н. А., Костылев В. А., Самохвалов А. А. // Тез. докл. IV Всес. школы-семинара «Спин-волновая электроника СВЧ». Львов, 1989. С. 151.
- [10] Kogenblit I., Samokhvalov A., Osipov V. // Soc. Sci. Rev. A. Phys. 1987. V. 8. P. 447—517.
- [11] Никифоров С. И., Эмирян Л. М., Гуревич А. Г., Радауцан С. И., Гэзлэван В. Е. // ФТТ. 1978. Т. 20. № 10. С. 3010—3014.
- [12] Ожогин В. И., Фарзетдинова Р. М., Михайлов А. С. // ЖЭТФ. 1990. Т. 97. № 3. С. 863—871.

Институт физики металлов УНЦ АН СССР
Свердловск

Поступило в Редакцию
6 августа 1990 г.
В окончательной редакции
3 декабря 1990 г.