

06

© 1990 г.

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА МАГНИТОСТАТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В МАГНИТНОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ HgCr_2Se_4

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

Исследуется влияние импульсных электрических и магнитных полей на длинноволновую часть спектра МСВ. Обнаружено, что электрические поля воздействуют на спектр как за счет создания магнитного поля протекающим через образец током, так и за счет изменения намагниченности вследствие разогрева магновов горячими посетителями заряда. Благодаря сравнительно большому времени магнон-фононного взаимодействия ($\sim 10^{-3}$ с) был зарегистрирован перегрев магнитной подсистемы относительно решетки на 5–7 град, однако экспериментальная методика позволяла регистрировать разницу температур $\sim 10^{-2}$ град. Обнаружено, что импульсные магнитные поля, воздействуя непосредственно на магнитную подсистему, вызывают ее перегрев (или охлаждение) относительно фононной подсистемы.

Одним из наиболее важных аспектов физики магнитных полупроводников является взаимодействие горячих дрейфующих носителей заряда со спиновыми волнами [1]. Согласно теории, это взаимодействие может приводить к ряду новых явлений, связанных с усилением, генерацией и разогревом магновов носителями заряда [2]. Ряд этих явлений уже обнаружен и исследован экспериментально, например разогрев магновов [3], генерация магновов [4], усиление спиновых волн с большими волновыми числами ($k \sim 10^5\text{--}10^6 \text{ см}^{-1}$) при достижении дрейфовой скорости носителей заряда фазовой скорости спиновых волн [5] и т. д. Однако до сих пор оставалось невыясненным влияние электрического поля на магнитоэлектрические волны (МСВ) с малыми $k \sim 10\text{--}10^3 \text{ см}^{-1}$, для которых заведомо не выполняются условия синхронизма $\omega = k \cdot v_{\text{др}}$ ввиду высокой скорости МСВ в этом случае. Эти волны вследствие сравнительно большой длины волны эффективно взаимодействуют с антеннами, относительно мало затухают и поэтому представляют наибольший интерес с точки зрения технических приложений.

Предварительно можно ожидать, что влияние электрического поля скажется на форме линий спектра МСВ (например, на ширине вследствие изменения затухания) и на положении линий в магнитном поле. Последнее возможно из-за разогрева магновов носителями заряда, сопровождающегося уменьшением намагниченности. Кроме того, в данной работе исследовано влияние небольших по амплитуде прямоугольных импульсов магнитного поля, модулирующих внешнее магнитное поле, на прохождение МСВ. В этом случае возможно два варианта воздействия импульсного магнитного поля на спектры МСВ. Первый вариант состоит в непосредственной модуляции внешнего магнитного поля, второй связан с изменением намагниченности образца во внешнем магнитном поле вследствие восприимчивости парапроцесса. При этом следует ожидать, что резкое включение магнитного поля может создавать неравновесность как внутри магнонной подсистемы, так и неравновесность между магнонной и фононной подсистемами.

Схема эксперимента (рис. 1) состояла в следующем. В монокристаллическом образце HgCr_2Se_4 размером $4 \times 1.5 \times 0.3$ мм, охлажденном до 77 К, с по-

мощью проволочных антенн диаметром 30 мкм возбуждались поверхностные магнитостатические волны (ПМСВ) с $k \leq 10^3 \text{ см}^{-1}$ [6] на частоте 8–9 ГГц. Усиление на модулирующей частоте 1 кГц и регистрация спектра ПМСВ производились стандартным образом. Затем модуляция отключалась и на контакты параллельно распространению ПМСВ подавались импульсы электрического поля длительностью 2–3 мкс и величиной до 2–3 кВ/см с частотой повторения 1–10 Гц. Сигнал с детектора усиливался широкополосным малошумящим усилителем в полосе 10 Гц–1 МГц и затем регистрировался стробоскопической приставкой с подавлением шумов [7]. Так как постоянный уровень сигнала с детектора, связанный с прохождением ПМСВ, отсекался усилителем, то в указанной полосе регистрировались импульсные изменения СВЧ прохождения, возникающие как отклик на действие импульса электрического поля. Описанная методика позволяла регистрировать изменения прохождения СВЧ мощности с разрешающей способностью до 10^{-4} от постоянного уровня ПМСВ. Для измерений использовались образцы HgCr_2Se_4 с проводимостью при 77 К от 10^{-1} до $10^{-3} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$.

Для создания импульсных магнитных полей на образец вблизи торцов наматывались катушки, содержащие по 10 витков провода диаметром 50 мкм. Импульс тока длительностью от 2 мкс до 10 мс с фронтами $\sim 5 \text{ нс}$ и амплитудой 10–20 мА позволял получать импульсы магнитного поля на напряженность 1–2 Э параллельный или антипараллельный внешнему постоянному магнитному полю. В этом случае также регистрировались импульсные изменения прохождения мощности ПМСВ, возникающие как отклик на действие импульсного магнитного поля.

На рис. 2, б и 3, б представлена форма временного отклика изменения СВЧ прохождения $S(t)$ на действие импульса электрического поля, которая представляет собой эволюцию во времени амплитуды одного (произвольно выбранного) из пиков спектра ПМСВ. На рис. 2, б приведен временной отклик СВЧ прохождения в низкоомном образце ($\sigma_{77} \approx 10^{-1} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$). Сигнал S состоит из безынерционного сигнала S_1 , повторяющего форму импульсов тока (рис. 2, а) и инерционного сигнала S_2 . На участке 1 сигнал S_2 меняется линейно со временем, затем после выключения импульса на участках 2 и 3 происходит релаксация сигнала с временем $\tau_2 \sim 10^{-3} \text{ с}$ и $\tau_3 \sim 1-2 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ соответственно. Зависимость $S_1(E)$ линейна и величина S_1 меняет знак при изменении направления электрического поля. Зависимость $S_2(E)$ близка к квадратичной и не меняется при изменении знака E . Следует иметь в виду, что на рисунке временной масштаб искажен для наглядности изображения. На самом деле участок 1 в 1000 раз короче участка 2. Амплитуды сигналов также даны в относительных единицах, так как амплитуда импульса электрического поля достигает 2–3 кВ/см, а S — нескольких мВ.

В высокоомном образце ($\sigma_{77} \approx 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$) форма временного отклика, качественно отличающегося от отклика низкоомного образца, показана на рис. 3. Здесь также можно выделить безынерционный сигнал S_1 и инерционный S_2 , обладающие такими же свойствами, как и соответствующие сигналы для низкоомных образцов: $S_1(E) = -S_1(-E)$, $S_2(E) = S_2(-E)$, кроме того, времена релаксации на участках 2 и 3 приблизительно такие же.

На рис. 4 приведена форма временного отклика изменения прохождения СВЧ мощности $\dot{S}(t)$ при подаче импульса магнитного поля. Здесь также можно выделить безынерционный S_1 и инерционный S_2 сигналы. Инерционная часть имеет такое же время 10^{-3} с , как и время τ_2 для импульсов электрического поля, однако процесс со временем $\tau_3 \sim 1-2 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ в данном случае отсутствует. При изменении полярности импульса форма отклика изменялась на противоположную, т. е. $S(H) = -S(-H)$.

Следует отметить два обстоятельства: 1) изменения согласования передаю-

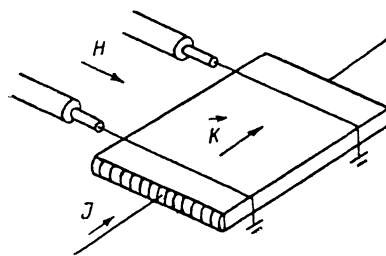


Рис. 1. Схема эксперимента.

Стрелками показаны направления магнитного поля H , электрического тока J и распространения ПМСВ (K).

щей антенны во время и после импульса электрического и магнитного полей не было, 2) во всех случаях при любой амплитуде импульсов электрического и магнитного поля и в любой момент времени зависимость S имеет вид производной от сигнала стационарного спектра ПМСВ по магнитному полю. Последнее обстоятельство позволяет интерпретировать полученные результаты следующим образом. Производная возникает либо при модуляции внешнего магнитного поля магнитным полем протекающего по образцу тока или импульсом магнитного поля от катушек, либо при сдвиге спектра ПМСВ из-за изменения намагниченности. Очевидно, что безынерционные сигналы, повторяющие форму импульсов тока для импульсов электрического и магнитного полей, связаны с модуляцией внешнего магнитного поля. Так, при характерных размерах образца ~ 1 мм и токе через него ~ 1 А напряженность магнитного поля у поверхности образца составляет ~ 1 Э. Можно предположить, что инерционные сигналы связаны с изменением намагниченности.

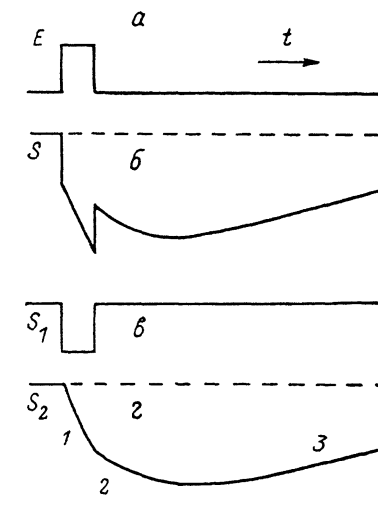
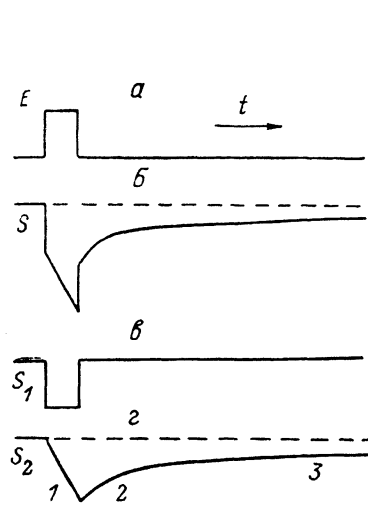


Рис. 2. Импульс электрического поля (а) и зависимость от времени изменения прохождения сигнала ПМСВ для низкоомного образца (б), состоящего из безынерционной (а) и инерционной (б) частей.

Рис. 3. То же, что и на рис. 2 для высокоомного образца (б).

Форма зарегистрированных временных изменений намагниченности от электрических импульсов в основном аналогична временным изменениям намагниченности в других магнитных полупроводниках HgCr_2Se_4 и EuO , возникающих под действием импульса сильного электрического поля и объясняемых на основе модели независимого разогрева магнов и фононов при большом времени магно-фононной релаксации [1]. Согласно этой модели, магны и фононы греются электрическим током независимо и с разной степенью интенсивности в зависимости от параметров магнитного полупроводника. При этом происходит уменьшение намагниченности, что видно из рис. 2, 3 (участок 1). После импульса с временем τ_2 происходит установление равновесия между магнонной и фононной подсистемами, что соответствует участкам 2 на рис. 2, 3. Затем образец остывает в термостате с временем τ_3 .

Отметим, что при подаче импульсов электрического поля в низкоомных образцах происходит перегрев магнов по сравнению с фононами, тогда как в высокоомных, наоборот, фононы греются сильнее, чем магны [1]. Такое различие вызывается, вероятно, тем, что в более проводящих образцах подвижность и концентрация носителей заряда существенно выше ($\mu \geq 10^2 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, $n \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$), чем в высокоомных ($\mu \leq 10^2 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, $n \sim 10^{16}-10^{17} \text{ см}^{-3}$) [8]. В низкоомных образцах перегрев магнитной системы достигал $5-7^\circ$. Заметим, что на фоне изменения прохождения, вызванного сдвигом спектра ПМСВ за счет уменьшения намагниченности, никаких явлений, связанных с изменением ширины линий или их интенсивности в пределах чувствительности измерений,

зачтено не было. Следует отметить, что достигнутая данной методикой чувствительность регистрации импульсных изменений намагниченности составляет 0.3 Гс, что соответствует разогреву на 10^{-3} град.

В случае подачи импульсов магнитного поля возможно воздействие лишь на магнитную систему. Механизм воздействия может заключаться в следующем. Во внешнем поле H устанавливается равновесное распределение магнов $n(q)$, определяющее намагниченность,

$$n(q) = \frac{1}{8\pi^3} \frac{4\pi q^2}{e^{\frac{\hbar\omega_q}{kT}} - 1} \quad (1)$$

и обладающих плотностью энергии

$$\varepsilon(q) = \frac{1}{8\pi^3} \frac{\hbar\omega_q 4\pi q^2}{e^{\frac{\hbar\omega_q}{kT}} - 1} \quad (2)$$

Здесь q — волновой вектор магнона, \hbar — постоянная Планка, $\omega_q = \gamma H + aq^2$ — частота магнона, γ — гиромангнитное отношение, a — обменный параметр.

Предположим, что магнитное поле резко изменилось от H до $H + \hbar$, так что распределение магнов по спектру и их число не успели измениться. Численные расчеты на основе (1) и (2) показывают, что в этом случае образуются как неравновесные магны, так и неравновесное распределение энергии по спектру. Острый максимум числа неравновесных магнов находится в дотепло-

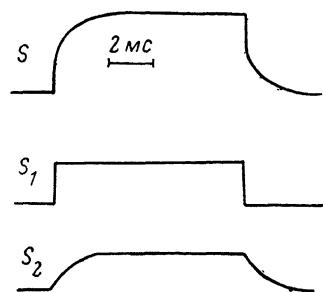


Рис. 4. Зависимость от времени изменения прохождения сигнала ПМСВ S , состоящего из безынерционной S_1 и инерционной S_2 частей, при действии прямоугольного импульса магнитного поля.

вой части спектра. Неравновесная энергия более равномерно распределена по спектру от дотепловых до тепловых магнов. В соответствии с [2] возможны следующие процессы установления равновесия. На первой стадии за счет трех и четырех магнонных процессов устанавливается новая температура магнонной подсистемы и соответствующее этой температуре новое значение намагниченности. На второй стадии со временем магнон-фононной релаксации $\tau_{\text{мф}}$ должно происходить установление теплового равновесия с решеткой. Так как $c_{\text{маг}} \ll c_{\text{рем}}$, то в этом случае процесс остывания решетки в термостат не фиксируется. Рис. 4 подтверждает это предположение, а именно на нем присутствует участок с временем $\tau \sim 10^{-3}$ с и отсутствует участок с τ_3 . Безынерционная составляющая отклика на действие импульса магнитного поля может быть обусловлена как модуляцией внешнего магнитного поля, так и процессами установления температуры внутри магнонной подсистемы.

Таким образом, электрическое поле с напряженностью 2—3 кВ/см, недостаточное для выполнения черенковской генерации магнов, тем не менее оказывает влияние на весь спектр МСВ с волновыми числами $\sim 10^3 \text{ см}^{-1}$ как за счет модуляции внешнего магнитного поля магнитным полем протекающего по образцу тока, так и за счет изменения его намагниченности в связи с разогревом магнов. Временной характер изменений намагниченности позволяет предположить, что в HgCr_2Se_4 наблюдается независимый разогрев фононов и магнов, причем в низкоомных образцах интенсивнее греются магны, а в высокоомных образцах из-за низкой подвижности носителей заряда интенсивнее греются фононы.

Внешнее импульсное магнитное поле также оказывает влияние на спектр МСВ в HgCr_2Se_4 как за счет собственно модуляции внешнего магнитного поля, так и за счет разогрева (или охлаждения) магнонной подсистемы во внешнем импульсном магнитном поле.

Описанная методика позволяет измерять весьма малые импульсные изменения намагниченности, недоступные другим методам.

Список литературы

- [1] *Korenblit I. Ya., Samokhvalov A. A., Osipov V. V.* // Phys. Rev. (Soviet Sci. Rev.) Section A. 1987. Vol. 8. P. 449—517.
- [2] *Samokhvalov A. A., Korenblit I. Ya., Osipov V. V. et al.* // 1984. Vol. 46. P. 191—198.
- [3] *Самохвалов А. А., Осипов В. В., Калининков В. Т., Аминов Т. Г.* // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 28. С. 413—416.
- [4] *Осипов В. В., Самохвалов А. А., Костылев В. А.* // ФТТ. 1987. Т. 29. Вып. 9. С. 2809—2811.
- [5] *Солин Н. И., Самохвалов А. А., Шумилов И. Ю.* // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 44. Вып. 10. С. 464—466.
- [6] *Гуляев Ю. В., Зильберман П. Е.* // РИЭ. 1978. Т. 23. № 5. С. 897—917.
- [7] *Ильин Д. А., Осипов В. В.* // ПТЭ. 1982. № 6. С. 96—98.
- [8] *Гижевский Б. А., Самохвалов А. А., Костылев В. А. и др.* // ФТТ. 1984. Т. 26. № 9. С. 2647—2650.

Институт физики металлов
Уральский научный центр АН СССР
Свердловск

Поступило в Редакцию
11 января 1989 г.

В окончательной редакции
22 мая 1989 г.