

УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ СВЧ МОЩНОСТИ ЧЕРЕЗ ФЕРРОМАГНИТНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК HgCr_2Se_4 В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Н. А. Виглин, В. В. Осипов, А. А. Самохвалов

Экспериментально изучено влияние сильного электрического поля на СВЧ прохождение, намагниченность и электросопротивление ферромагнитного полупроводника HgCr_2Se_4 n -типа. Показано, что значительное (до нескольких десятков раз) увеличение прохождения СВЧ связано с уменьшением намагниченности и увеличением электросопротивления. В качестве возможного объяснения предлагается разогрев магнонов носителями заряда, сопровождающийся возникновением неравновесной концентрации электронов в зоне проводимости и переходом электронов с переворотом спина на донорные уровни.

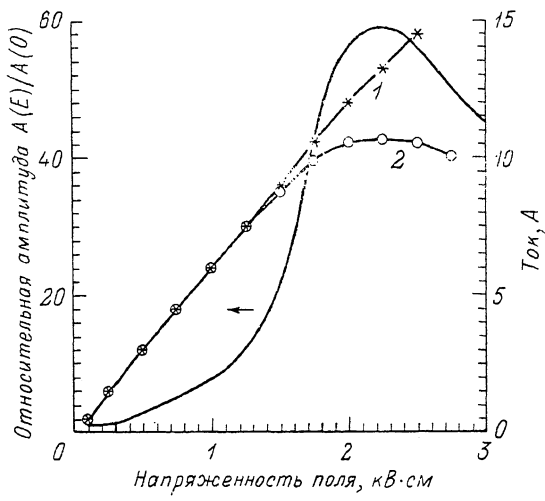
Ранее влияние сильного электрического поля на прохождение магнитостатических волн в ферромагнитном полупроводнике (ФМП) HgCr_2Se_4 n -типа было исследовано в [1]. В частности, в [1] было показано, что при $T \geq 77$ К изменение прохождения СВЧ мощности обуславливается сдвигом спектра МСВ при уменьшении намагниченности ФМП вследствие разогрева магнонов носителями тока. Далее в статьях [2, 3] для HgCr_2Se_4 n -типа при 4.2 К было обнаружено увеличение амплитуды пиков на спектре зависимости СВЧ прохождения от магнитного поля под действием импульсов сильного электрического поля. В частности, было зафиксировано, что амплитуда пиков на спектре возрастает за время действия импульса в несколько раз и потом релаксирует к своему первоначальному значению за 10^{-3} с. Однако какого-либо объяснения обнаруженному эффекту в [2, 3] предложено не было.

Для выяснения механизма увеличения прохождения СВЧ мощности через ферромагнитный полупроводник в электрическом поле нами были проведены одновременные измерения прохождения СВЧ мощности, намагниченности и электросопротивления HgCr_2Se_4 n -типа при действии импульса сильного электрического поля.

Для измерений использовались образцы прямоугольной формы, приготовленные из монокристаллов HgCr_2Se_4 n -типа, отожженные в парах ртути под давлением 0.6 атм, с сопротивлением $\rho_{300} \approx 10^1$, $\rho_4 \approx 1$, $\rho_{\max} \approx 10^3$ Ом·см. Возбуждение и прием СВЧ колебаний в пластине ФМП, как и в [1, 2], производились с помощью проволочных антенн диаметром 30 мкм. СВЧ мощность, прошедшая через образец, регистрировалась детектором и представляла собой интерференционную картину за счет магнитостатических волн и наводки на приемной антенне от электромагнитных колебаний. Интерференционная картина имела вид спектра, состоящего из ряда линий, зависящих от магнитного поля. Изменения СВЧ прохождения, возникающие в результате действия импульса электрического поля, усиливались широкополосным усилителем в полосе частот 10 Гц—1 МГц и регистрировались стробоскопическим преобразователем [4]. Таким образом, на фоне стационарного расположения пиков регистрировалось изменение амплитуды линий и их положения по магнитному полю. Изменение намагниченности регистрировалось катушкой, намотанной на образец.

Сигнал с катушки поступал на широкополосный интегратор. Изменение сопротивления образца под действием импульса сильного электрического поля регистрировалось следующим образом. На образец через диодные развязки подавались небольшой постоянный ток и импульс сильного электрического поля. Для предотвращения перегрузки входного усилителя осциллографа, используемого для наблюдения изменений сопротивления, на время действия мощного импульса вход осциллографа закорачивался.

Было обнаружено, что амплитуда пиков прохождения СВЧ мощности увеличивается в результате действия импульсов электрического поля приблизительно пропорционально энергии импульса и, в частности, пропорционально длительности импульса. После импульса амплитуда пиков релаксирует к своему первоначальному значению за время порядка 10^{-3} с, как и в работе [2]. В основном амплитуда увеличивалась при $E=2$ кВ/см



и $\tau_{\text{вмк}}=4$ мкс в 3—4 раза, однако амплитуда одной из линий увеличивалась в 60 раз. При больших амплитудах и длительностях импульса наступало изменение спектра из-за значительного джоулевого разогрева образца (более чем

Рис. 1. Вольт-амперная характеристика, измеренная по переднему (1) и заднему (2) фронтам импульса тока, и относительный рост амплитуды пиков прошедшей СВЧ мощности в сильном электрическом поле.

на 10 К), уменьшения намагниченности при этом и соответствующего сдвига линий по магнитному полю. Нагрев оценивался по энергии импульса протекающего через образец тока с учетом зависимости теплоемкости от температуры и в предположении адиабатичности процесса за время действия импульса.

На рис. 1 показана зависимость амплитуды $A(E)$ одной из линий спектра прохождения СВЧ от электрического поля при $T=4.2$ К. Здесь же приведена ВАХ данного образца, снятая по переднему и заднему фронтам токового импульса. Видно, что амплитуда данной линии увеличивается приблизительно в 60 раз. Рост прекращается при уменьшении дифференциальной проводимости. Необходимо отметить, что обнаруженный 60-кратный рост $A(E)$ невозможно объяснить джоулевым разогревом образца. Так, при увеличении температуры от 4.2 до 50 К амплитуда этой линии при отсутствии электрического поля уменьшается в два раза и далее увеличивается в 1.5 раза при 100 К, тогда как джоулев нагрев образца до загиба ВАХ не превышал 10° при максимальной амплитуде импульсов тока.

На рис. 2 представлены временные изменения A, M, ρ в результате действия импульса электрического поля. В данном случае измерения были проведены для $E=0.7$ кВ/см, когда отклонения ВАХ от закона Ома невелики. Видно, что релаксация A, M и ρ к своему первоначальному значению происходит в две стадии. Первая стадия длится 1 мс, а вторая 10—15 мс. Изменение всех величин на первой стадии значительно превышает изменение на второй. Такое поведение $M(t)$ в результате действия импульса сильного тока для ФМП объяснялось в [5, 6] разогревом магнововносителями тока, остыванием магновов на фоновых за время $\approx 10^{-3}$ с и далее остыванием всего кристалла в термостате за время $\geq 10^{-2}$ с.

Из рис. 2 также видно, что все три процесса имеют одинаковые времена релаксации и, следовательно, связаны между собой. Увеличенная амплитуда A существует только при отклонении M и ρ от равновесных значений. При этом относительная величина уменьшения намагниченности составляет $\approx 10^{-3}$, а относительное увеличение сопротивления $\approx 10^{-2}$.

Для объяснения полученных результатов рассмотрим некоторые характерные особенности зонного строения ФМП HgCr_2Se_4 . Известно, что при $T < T_c$ зона проводимости вследствие s - d -обменного взаимодействия расщеплена на две подзоны с различной спиновой поляризацией. Все носители находятся в нижней подзоне. Аналогичное, но меньшее по величине расщепление $\Delta_{\text{дон}}$ испытывают донорные уровни [7]. Точное значение спинового расщепления донорных уровней неизвестно. Предположим, что расщепление донорных уровней мало, так что носители на донорах по спину не поляризованы ($\Delta_{\text{дон}} \ll kT$). При разогреве магнонов носителями тока и соответствующим уменьшением намагниченности [5, 6], дно зоны

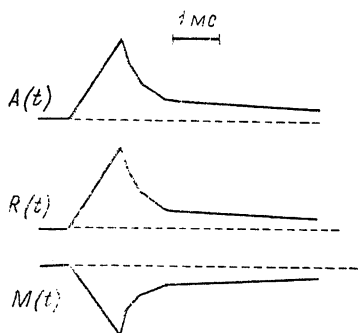


Рис. 2. Временные изменения амплитуды пика СВЧ мощности $A(t)$, электросопротивления $r(t)$ и намагниченности $M(t)$, возникающие как отклик на действие импульса сильного электрического поля.

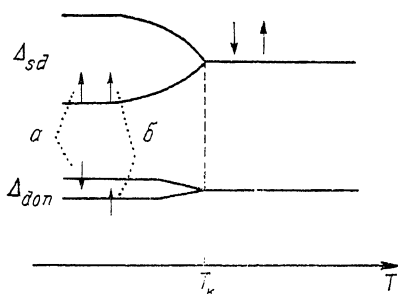


Рис. 3. Схема переходов электронов из зоны проводимости на донорные уровни с переворотом (а) и без переворота (б) спина.

проводимости движется вверх, так что в зоне проводимости появляется неравновесная концентрация носителей заряда, перескакивающих на донорные уровни. При этом половина переходов (рис. 3) происходит без переворота спинов, а половина — с переворотом. При остывании магнонов дно зоны проводимости движется вниз и электроны переходят с доноров в зону проводимости, что также сопровождается переворотом спина. Как известно [8], вследствие s - d -обмена процессы с переворотом спина сильно связаны с возбуждением колебаний магнитной подсистемы. Отметим, что возникновение неравновесной концентрации носителей заряда в зоне проводимости при разогреве магнонов в EuO описано в работе [9]. Движение дна зоны проводимости, возникающее как при разогреве магнитной подсистемы носителями заряда во время действия импульса электрического поля, так и при ее остывании в решетку, вызывает поток электронов из зоны проводимости на донорные уровни, обладающих энергией и переворачивающих спин.

Таким образом, увеличение СВЧ прохождения через ФМП HgCr_2Se_4 , возникающее вследствие действия импульса электрического тока и совпадающее с релаксациями M и ρ после импульса, вероятно, объясняется возникновением неравновесной концентрации электронов в зоне проводимости из-за движения дна зоны проводимости относительно примесных уровней, находящихся ниже дна зоны проводимости. Такое предположение позволяет объяснить наличие увеличенного СВЧ прохождения и после выключения импульса электрического тока. Необходимо отметить, что теоретического описания этих явлений в настоящее время не существует.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Осипов В. В., Виглин Н. А., Костылев В. А., Чеботаев Н. М., Самохвалов А. А. // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 52. № 7. С. 996—998.
- [2] Виглин Н. А., Самохвалов А. А., Чеботаев Н. М. // Труды «СВЧ ферритовые материалы и приборы». Л., 1989. Т. 1. С. 10—11.
- [3] Костылев В. А., Самохвалов А. А., Виглин Н. А., Чеботаев Н. М. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 6. С. 0000—0000.
- [4] Ильин Д. А., Осипов В. В. // ПТЭ. 1982. № 6. С. 96—98.
- [5] Самохвалов А. А., Осипов В. В., Калинин В. Т., Аминов Т. Г. // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 28. № 6. С. 413—416.
- [6] Самохвалов А. А., Осипов В. В., Иваев А. Т. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 30. № 10. С. 658—661.
- [7] Самохвалов А. А. // Редкоземельные полупроводники. М.: Наука, 1977. С. 5—47.
- [8] Коренблит И. Я., Танхелевич Б. Г. // ФТТ. 1976. Т. 18. № 1. С. 62—72; Haas C. // IEE. Trans. Magn. 1969. V. 5. N 3. P. 487.
- [9] Осипов В. В., Самохвалов А. А., Чеботаев Н. М. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 7. С. 2166—2168.

Институт физики металлов
УрО АН СССР
Екатеринбург

Поступило в Редакцию
17 апреля 1991 г.