

А. А. Самохвалов, В. В. Осипов. Электрон-магнитное взаимодействие в магнитных полупроводниках. Магнитные полупроводники — ферромагнитно-упорядоченные полупроводниковые соединения с довольно высокой подвижностью носителей заряда — моноокись европия EuO и шпинели типа CdCr_2Se_4 были открыты в 60-х годах, и с тех пор физика магнитных полупроводников занимает одно из видных мест в физике твердого тела. Интерес к магнитным полупроводникам обусловлен наличием электрической и магнитной подсистем, сильно взаимосвязанных между собой на основе $s-d$ -обменного взаимодействия Вонсовского¹. Это взаимодействие приводит к ряду уникальных явлений, наблюдаемых в магнитных полупроводниках²: гигантскому магнитосопротивлению, переходу диэлектрик-металл с очень большим изменением электропроводности, гигантскому сдвигу края оптического поглощения, образованию спин-поляризованных комплексов — ферронов и т. д. Однако этими явлениями, наблюдаемыми в равновесных условиях, возможности магнитных полупроводников не исчерпываются. Новая большая группа физических

явлений возможна за счет взаимодействия между элементарными возбуждениями — зонными электронами, магнонами и фононами в неравновесных условиях^{3, 4}. Например, взаимодействие дрейфующих в сильном электрическом поле горячих носителей заряда со спиновыми волнами-магнонами может приводить к усилению или черенковской генерации спиновых волн, разогреву магнонов и к ряду других явлений электрон-магнонного взаимодействия. Такое возбуждение спиновых волн (магнонов) горячими носителями заряда при благоприятных условиях должно влиять на макроскопические параметры магнитных полупроводников. В частности, при этом должна уменьшаться намагниченность, поскольку каждый возбужденный магнон уменьшает магнитный момент на 1 магнетон Бора. Так как в магнитном полупроводнике электронная структура, определяющая его физические свойства, благодаря $s-d$ -обменному взаимодействию зависит от намагниченности, то соответственно будут изменяться и другие физические параметры — электрические, оптические, магнитооптические, магнитные и диэлектрические сверхвысокочастотные и т. д.

Для экспериментального наблюдения возможных явлений сильного электрон-магнонного взаимодействия были выращены достаточно большие и совершенные монокристаллы магнитных полупроводников на основе EuO , CdCr_2Se_4 и HgCr_2Se_4 с достаточно высокой подвижностью носителей заряда (до $\sim 1000 \text{ см}^2 \text{ в}^{-1} \text{ с}^{-1}$), малым затуханием спиновых волн ($\Delta H_k \sim 1\Theta$), высокой намагниченностью насыщения и сравнительно низкой температурой Кюри. Был также создан комплекс экспериментальных методик для исследований магнитных, электрических, оптических, магнитооптических и сверхвысокочастотных свойств магнитных полупроводников в сильных электрических полях в импульсном режиме, чтобы избежать джоулева нагрева.

В температурной области 4,2—300 К были исследованы намагниченность, электропроводность, СВЧ поглощение, оптические магнитооптические и другие параметры магнитных полупроводников в зависимости от напряженности электрического и магнитного полей, а также их релаксационные характеристики во время и после импульса. Измерения проводились на монокристаллах магнитных полупроводников EuO с n -типом проводимости, $\text{Cd}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$ с p -типом проводимости и HgCr_2Se_4 с n - и p -типом проводимости с различной концентрацией и подвижностью носителей заряда.

Результаты свидетельствуют о существенном влиянии сильного электрического поля (до $10 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$) на физические свойства магнитных полупроводников. Так, в высокоомных магнитных полупроводниках $\text{Cd}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$ с p -типом проводимости в области магнитного упорядочения обнаружены аномалии в зависимости электропроводности от напряженности электрического поля, свидетельствующие о черенковской генерации магнонов носителями заряда⁵. Более четкие эффекты наблюдались в магнитных полупроводниках с большей концентрацией подвижных носителей заряда^{6, 7}. В этом случае эффект уменьшения электропроводности за счет возбуждения магнонов горячими носителями заряда достигал 50%, свидетельствуя о существенной передаче энергии от системы носителей заряда магнитной системе. В этих же образцах был обнаружен эффект уменьшения намагниченности в сильном электрическом поле (до 10%) за счет возбуждения магнонов носителями заряда. Эффекты уменьшения электропроводности и намагниченности в сильном электрическом поле исследованы в зависимости от условий (напряженности электрического и магнитного полей, температуры) и параметров магнитных полупроводников (электропроводности, концентрации и подвижности носителей заряда). Выяснено, что указанные эффекты имеют место только в тех случаях, когда имеется достаточно высокая концентрация подвижных носителей заряда. Исследованы релаксационные характеристики намагниченности и электропроводности. Во время электрического импульса намагниченность уменьшается, а после импульса, в зависимости от условий опыта и параметров магнитного полупроводника, намагниченность либо про-

должает уменьшаться (хотя $E = 0$), либо увеличивается, возвращаясь к исходному значению в обоих случаях со временем 10^{-3} с. Этот странный на первый взгляд результат был объяснен в предположении независимого и различного по интенсивности возбуждения (нагрева) магнов и фононов носителями заряда. Согласно теории ⁴ такая возможность обусловлена слабой связью магнонной и фононной подсистем в магнитных полупроводниках с низкой температурой Кюри (более низкой, чем температура Дебая).

Для оценки эффективности возбуждения магнов горячими носителями заряда введен параметр $\gamma = \Delta T_m / \Delta T_f$, равный отношению приращения температуры магнов во время импульса к температуре фононов. ΔT_m и ΔT_f определяются экспериментально по релаксационным кривым намагниченности. Проведен комплекс исследований параметра γ в зависимости от напряженности электрического и магнитного полей, температуры, концентрации и подвижности носителей заряда в магнитном полупроводнике. Результаты этих исследований согласуются с теорией ⁴.

Полученные результаты по возбуждению магнов горячими носителями заряда подтверждены независимыми исследованиями температур горячих носителей заряда и магнов по температурам СВЧ шумов ⁸. Эти исследования показали, что в типичных условиях опыта имеет место разогрев носителей заряда от нескольких десятков до нескольких сотен кельвинов. Обнаружен также разогрев магнов до нескольких десятков кельвинов.

Полученные результаты по возбуждению магнов носителями заряда имеют ряд следствий для других физических свойств магнитных полупроводников. Эти следствия определяются, во-первых, влиянием на энергетический электронный спектр магнитного полупроводника уменьшения намагниченности (за счет возбуждения магнов) и, во-вторых, возможностью контролируемой передачи энергии от носителей заряда магномам. Отмеченное можно проиллюстрировать результатами опытов по влиянию сильного электрического поля на СВЧ поглощение ⁹, а также на оптические и магнитооптические параметры ¹⁰ магнитных полупроводников.

В целом можно заключить, что изложенные результаты являются первыми, но в достаточной степени обнадеживающими шагами в направлении к новой области прикладной физики твердого тела — полупроводниковой магнитоэлектроники — области с существенно новыми возможностями для техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вонсовский С. В. Магнетизм. — М.: Наука, 1971; ЖЭТФ, 1946, т. 16, с. 981.
2. Самохвалов А. А. — В кн.: Редкоземельные полупроводники. — Л.: Наука, 1977. — С. 5.
3. Ахизер А. И., Барьяхтар В. Г., Пелетминский С. В. — ЖЭТФ, 1963, т. 45, с. 337.
4. Коренблит И. Я., Танхилевич Б. Г. — ФТТ, 1976, т. 18, с. 62.
5. Самохвалов А. А., Осипов В. В., Калинин В. Т., Амминов Т. Г. — Письма ФТТ, 1978, т. 20, с. 595.
6. Самохвалов А. А., Осипов В. В., Калинин В. Т., Амминов Т. Г. — Письма ЖЭТФ, 1978, т. 28, с. 413.
7. Самохвалов А. А., Осипов В. В., Иваев Л. Т. — Ibid., 1979, т. 30, с. 658.
8. Гальдикас А. П., Матулечене И. Б., Самохвалов А. А., Осипов В. В. — ФТТ, 1983, т. 25, с. 1999.
9. Солин Н. И., Самохвалов А. А., Калинин В. Т. — ФТТ, 1976, т. 18, с. 2104.
10. Самохвалов А. А., Гуничев А. Ф., Виглин Н. А., Сухорухов Ю. П. — В кн. Тезисы докладов Всесоюзной конференции по физике и химии редкоземельных полупроводников. — Л.: Наука, 1979. — С. 40.