

ЧАСТОТНЫЕ, ВРЕМЕННЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ФОТОФЕРРОМАГНИТНОГО ЭФФЕКТА В  $Cd_{1-x}Ga_xCr_2Se_4$

С. Г. Рулов, В. Г. Веселогс,  
Г. И. Виноградова, В. Е. Махоткин

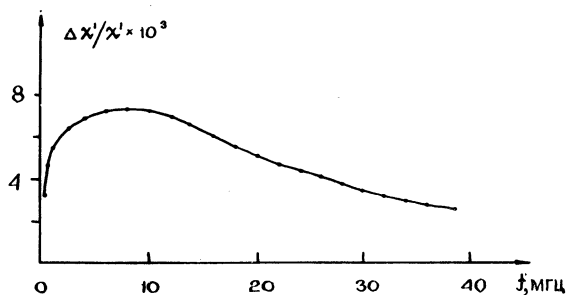
УДК 538.6

Исследуются спектральные и временные характеристики фотоферромагнитного эффекта в  $Cd_{1-x}Ga_xCr_2Se_4$  и сравниваются с аналогичными характеристиками фотопроводимости. Делается вывод о взаимном расположении донорных уровней и зоны  $Cr^{2+}$ .

Хромовая шпинель  $CdCr_2Se_4$  является ферромагнитным полупроводником с точкой Кюри  $130^{\circ}K$ . Это одно из немногих веществ, магнитная проницаемость которого изменяется под действием света. Этот эффект принято называть фотоферромагнитным эффектом (ФФЭ) /1,2/. В работе /1/ приводятся спектры ФФЭ и фотопроводимости (ФП), причем спектр ФП имеет два максимума, один из которых расположен в той же спектральной области, что и пик ФФЭ (в области 1 мкм). Используя модель зонной структуры, предложенную Гуденафом /3/, можно предположить, что энергетический переход, соответствующий этому пику, происходит из валентной зоны, образованной р-электронами, в узкую d-зону с малой подвижностью, которая появляется при образовании  $Cr^{2+}$ . Ионы  $Cr^{2+}$  обладают значительно большей анизотропией, чем ионы  $Cr^{3+}$  /4/. Поэтому, если в результате фотозаброса образуются ионы  $Cr^{2+}$ , то при этом должна расти анизотропия вещества, что ведет к изменению его магнитных характеристик.

В данной работе измерения проводились на монокристаллических образцах  $CdCr_2Se_4$ , выращенных методом жидкостного переноса. Образец помещался в LC-контур и по изменению характеристик этого контура (добротности и резонансной частоты) определялось изменение компонент магнитной радиочастотной восприимчивости  $\chi = \chi' - j\chi''$ .

Установка для измерения действительной части восприимчивости описана в работе /2/. Для определения мнимой части радиочастотной восприимчивости применялся стандартный куметр. При освещении кюветы с сердечником из монокристаллов  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  белым светом наблюдается увеличение резонансной частоты и добротности кон-



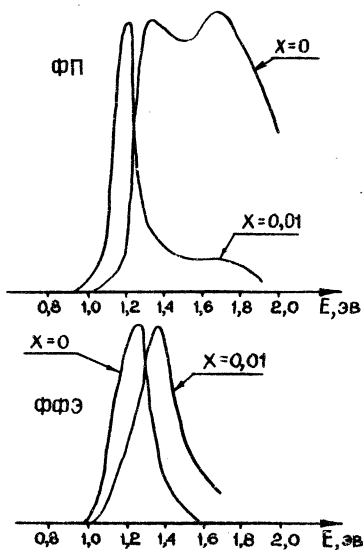
Р и с.1. Зависимости амплитуды ФФЭ от частоты

тура, что обусловлено уменьшением компонент радиочастотной восприимчивости  $\chi'$  и  $\chi''$  соответственно. При интенсивности света  $100 \text{ мвт/см}^2$  величина ФФЭ для чистого  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  составляла для действительной части восприимчивости  $\Delta\chi'/\chi' = -0,01$ , а для мнимой  $\Delta\chi''/\chi'' = -0,25$  при частоте 3 МГц.

Нами исследовалась радиочастотная восприимчивость  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  в диапазоне частот 0,5 - 100 МГц. Мнимая часть восприимчивости  $\chi''$  растет прямо пропорционально частоте, в то время как действительная часть восприимчивости остается постоянной во всем диапазоне изменения частоты с точностью до третьего знака. Зависимость амплитуды ФФЭ от частоты приведена на рис.1. Начиная от 0,5 МГц амплитуда ФФЭ растет, достигая в области 6 МГц максимума, а затем монотонно спадает к 40 МГц.

Для образцов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$  проводились измерения амплитудной зависимости ФФЭ от интенсивности падающего света с длиной волны  $\sim 1 \text{ мкм}$ . Эти измерения показывают степенную зависимость с показателем степени  $\alpha \sim 1/2$  при  $T = -78^\circ\text{К}$ . Это говорит о наличии квадратичной рекомбинации, на что указывают и данные по фотопроводимости /5/.

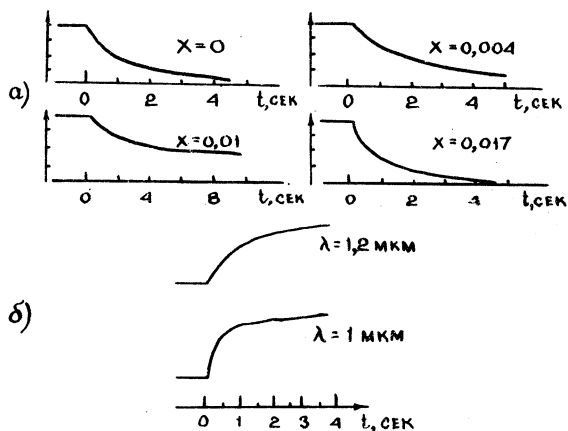
Были исследованы спектральные характеристики ФФЭ и ФП образцов  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  при различном легировании галлием. Все спектры были отнормированы с учетом квадратичной зависимости ФФЭ и ФП от интенсивности падающего излучения. На рис.2 приведены спектры



Р и с.2. Спектры фотопроводимости и фотоферромагнитного эффекта для чистого и легированного образцов

ФФЭ, ФП, из которых видно, что с легированием длинноволновой край ФП смещается в сторону меньших энергий, в то время как длинноволновый край ФФЭ смещается в сторону больших энергий. Это можно объяснить тем, что легирование  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  галлием приводит к образованию примесной зоны. Эта зона частично термически ионизирована, и поэтому в наших экспериментах наблюдается расширение фоточувствительности в сторону длинных волн. Времена релаксации фотопроводимости, осуществляющейся через примесные уровни, сильно зависят от степени легирования. Начиная от  $X=0,004$  до  $X=0,01$  времена релаксации растут до нескольких десятков секунд, дальнейшее легирование приводит к резкому уменьшению времен ре-

лаксации до 50 мсек. Кривые релаксации ФФЭ для монокристаллических образцов приведены на рис.3а. Все кривые сняты при одной и той же интенсивности света  $J = 2$  мвт с длиной волны  $\lambda = 1$  мкм. Из кривых релаксации видно, что при небольшом легировании галлием до  $X = 0,01$  появляется длинновременная составляющая с  $\tau$  до



Р и с.3. а) Кривые релаксации амплитуды ФФЭ при различном легировании галлием. б) Кривые нарастания амплитуды ФФЭ для разных длин волн падающего света

15 сек. Дальнейшее легирование приводит к резкому падению времен релаксации до 100 мсек и к уменьшению амплитуды ФФЭ. Эти зависимости объясняются тем, что с увеличением легирования, вследствие термической ионизации и перекрытия примесной зоны и зоны  $\text{Cr}^{2+}$ , происходит частичное заполнение зоны  $\text{Cr}^{2+}$ . Это приводит к смещению длинноволнового края спектра ФФЭ в сторону больших энергий, а также к уменьшению амплитуды ФФЭ с легированием. Уровни зоны  $\text{Cr}^{2+}$  и близкие по энергиям примесные уровни галлия могут образовывать связанные состояния, т.е. между этими уровнями могут быть безэнергетические или термические переходы. При этом времена жизни связанных состояний  $\tau_{\text{св}}$  и амплитуда ФФЭ зависят от времени жизни на каждом из этих уровней и плотности уровней галлия  $dN/dE$ . При слабом легировании эти уровни ведут себя как центры прилипания, что ведет к росту  $\tau_{\text{св}}$  с увеличением концентрации

этих центров. Дальнейшее легирование ведет к образованию рекомбинационных центров, и времена релаксации ФФЭ должны уменьшаться с легированием.

Интересно отметить, что при слабом легировании до  $X = 0,004$  наблюдается увеличение ФФЭ /2/, так как образование связанных состояний при очень слабом легировании увеличивает эффективное время пребывания электронов на уровнях  $Cr^{2+}$ . Большое легирование уменьшает амплитуду ФФЭ, так как растет плотность уровней Ga, что ведет к уменьшению эффективного времени пребывания электронов, возбуждаемых светом, на уровнях  $Cr^{2+}$ .

Если часть зоны  $Cr^{2+}$  образует с уровнями галлия связанные состояния, то при освещении образца светом с энергией фотона, соответствующей забросу на эти связанные уровни, а затем светом с большей энергией фотонов, должны наблюдаться разные времена нарастания ФФЭ. Действительно, для  $CdCr_2Se_4$ , легированного галлием, наблюдается зависимость времени нарастания ФФЭ от длины волны падающего света. Так для образца  $Cd_{1-x}Ga_xCr_2Se_4$  с  $X=0,01$  наблюдалось, что при равных интенсивностях света время нарастания ФФЭ для света  $\lambda = 1,2$  мкм в три раза больше, чем для света  $\lambda = 1$  мкм (рис.3б). Для нелегированного  $CdCr_2Se_4$  времена нарастания и спадения ФФЭ не зависят от длины волны падающего света.

В заключение выражаем благодарность Шабунинной Г. Г. за приготовление образцов и припайку контактов.

Поступила в редакцию  
14 ноября 1974 года.

После переработки  
20 февраля 1975 года.

### Л и т е р а т у р а

1. Л. Анзина и др. Международная конференция по магнетизму МКМ-73, т. 5, доклад 27А - V6.
2. В. Г. Веселаго и др. Письма ЖЭТФ, 15, 316 (1972).
3. J. B. Goodenough. J. Phys. Chem. Solids., 30, 261 (1969).
4. H. L. Pinch, S. B. Berger. J. Phys. Chem. Solids, 29, 2091 (1968).
5. Т. Аминов и др. ФТТ, 16, 1673 (1974).