

ИНВЕРСИЯ ТИПА ПРОВОДИМОСТИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$   
ПРИ ПЕРЕХОДЕ В ФЕРРОМАГНИТНОЕ СОСТОЯНИЕ.

К. М. Голант, А. В. Филатов \*)

УДК 538.632

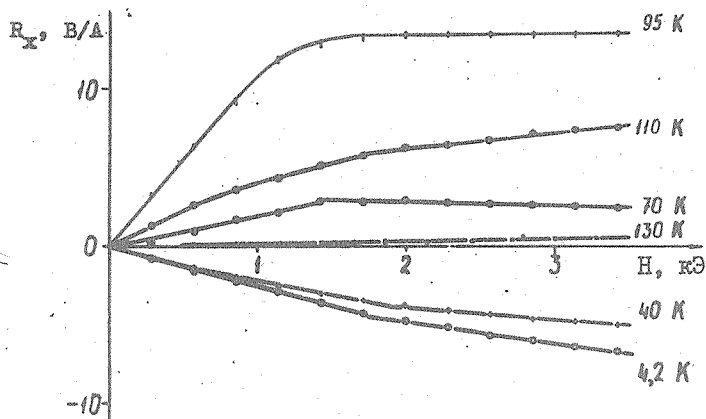
Обнаружено изменение знака нормального коэффициента Холла в нелегированных монокристаллах  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$  при переходе в магнитоупорядоченное состояние. Эффект интерпретируется стимулированной магнитным порядком Андерсоновской делокализацией примесных состояний.

Нами обнаружена инверсия эффекта Холла в нелегированных монокристаллах магнитного полупроводника  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$ , вызванная переходом в ферромагнитное состояние. Измерения эдс Холла проводились в режиме постоянного тока потенциальным методом. Методика приготовления образца и способ обработки данных описаны в работах /1,2/.

На рис. 1 изображены полевые зависимости величины  $\bar{R}_x = V_x/I$ , где  $V_x$  - эдс Холла,  $I$  - ток, протекающий через образец. Видно, что охлаждение образца ниже температуры Кюри  $T_C = 106$  К сопровождается резким уменьшением нормального коэффициента Холла  $R_0$ , величина которого обращается в нуль при  $T = T_K \sim 95$  К (рис.). При более низких температурах знак  $R_0$  становится отрицательным, что соответствует переходу к электронному типу проводимости.

\*) Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова АН СССР, г. Москва.

рис.) Величина  $R_0$  при  $T < T_C$  определяется из кривых  $R_x(H)$  в области полей насыщения, где уже нет доменной структуры намагниченности образца.



Р и с. 1. Эффект Холла в  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$  при различных температурах (цифры у кривых - температура в градусах Кельвина). Кривые получены на прямоугольной пластинке размером  $0,4 \times 0,8 \times 2,4 \text{ мм}^3$

Величина удельного сопротивления образца  $\rho$  растет при понижении температуры до  $T \sim T_k$  и слабо падает при  $T < T_k$ , как это показано на рис. 2. Там же изображена температурная зависимость  $R_0$ , согласно которой  $\rho$  (296 K) =  $1,1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $n$  (4,2 K) =  $1,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , где  $p$  и  $n$  - холловские концентрации дырок и электронов соответственно.

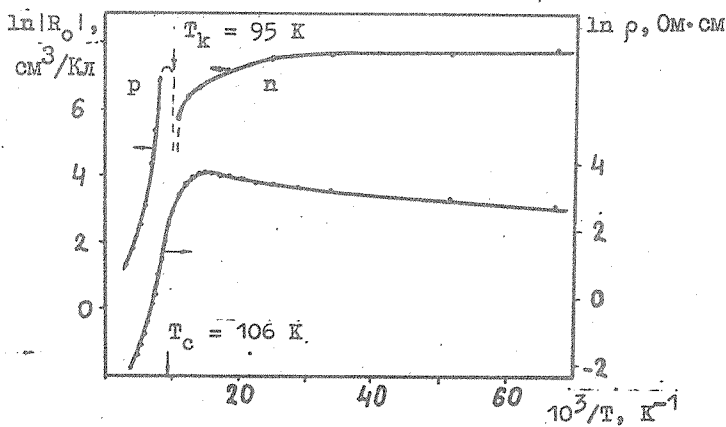
На рис. 3 приведена температурная зависимость холловской подвижности  $\mu = R_0/\rho$ . Видно, что подвижности электронов и дырок изменяются по степенному закону за исключением интервала  $65 \text{ K} \leq T \leq 150 \text{ K}$ , где уже не работает однозонное приближение и разделить холловскую подвижность на электронную и дырочную не представляется возможным.

Отметим, что по данным оптических измерений именно в этом температурном интервале магнитное красное смещение ширины запрещенной зоны  $E_g$  наиболее сильно. Величина  $E_g$  по данным работы /3/ изменяется от значения  $\sim 0,7$  эВ при  $T \sim 150 \text{ K}$  до  $E_g \sim 0,3$  эВ при  $T \sim 50 \text{ K}$ .

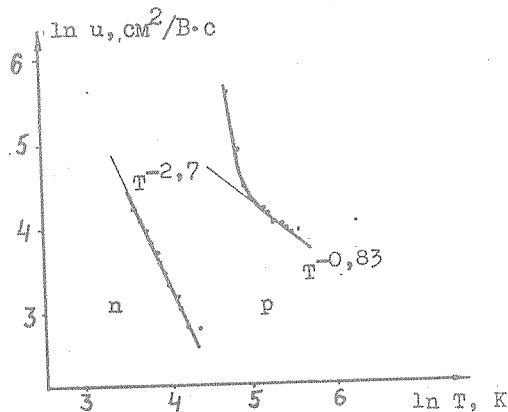
Характерные значения  $E_g$  показывают, что наблюдаемая инверсия не может объясняться обычным вымораживанием носителей и переходом от собственной проводимости к примесной. В поль-

зу исключительно примесной природы эффекта свидетельствуют также высокая для чистого полупроводника концентрация носителей и их сравнительно низкая подвижность (см. рис. 3).

Наблюдаемую инверсию коэффициента Холла можно объяснить в предположении о нестехиометрии исследуемых образцов. Нестехиометрии в  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$  может быть обусловлена дефицитом как по Se (доноры), так и по Hg (акцепторы), что допускает рассмотрение исследуемых монокристаллов как частично компенсированных полупроводников р-типа. При этом в парамагнитной фазе проводимость определяется термически активированными дырками валентной зоны, а концентрация локализованных на акцепторах электронов еще мала для их коллективизации в примесной полосе. Как показано в работе /4/, установление магнитного порядка приводит к уменьшению энергии активации примесных центров в магнитном полупроводнике за счет выигрыша в s-d обменной энергии. Благодаря этому уровень химпотенциала может пересечь полосу делокализованных примесных состояний и вызвать переход Андерсона /5/. При этом электронная проводимость в акцепторной полосе становится определяющей, что и приводит к инверсии эффекта Холла.



Р и с. 2. Температурные зависимости  $R_H$  и  $\rho$ .



Р и с. 3. Зависимость холловской подвижности от температуры

По-видимому, аналогично могут объясняться инверсия типа проводимости в поликристаллах  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$  легированных  $\text{In}$  /6/, а также резкое уменьшение  $R_0$  в системах  $\text{Cd}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$  /2,7/ и  $\text{Cd}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$  /8/ при переходе в ферромагнитное состояние. Причиной этих эффектов является, на наш взгляд, стимулированный  $s-d$  обменом переход к электронной проводимости по акцепторной полосе, компенсирующей дырочный вклад зонных носителей в эффект Холла. Эта компенсация может быть либо полной, либо частичной, что определяется главным образом нестехиометрией образца.

Авторы благодарят И. С. Ковалеву и В. А. Левшина за предоставление монокристаллов, а также В. Т. Калининкова, В. М. Новоторцева и В. Г. Веселаго за поддержку данной работы.

Поступила в редакцию  
3 ноября 1980 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. К. М. Голант, В. С. Коржавин, В. Ф. Харламов, В. В. Пуржан, Препринт ФИАН № 157, М., 1977 г.
2. К. М. Голант, Е. С. Живописцев, В. Г. Веселаго, Препринт ФИАН № 218, М., 1978 г.

3. T. Arai, M. Wakaki, S. Onari, J. Phys. Soc. Jap., 34, 68 (1973).
4. А. П. Григин, Э. Л. Нагаев, Phys. St. Sol. (b), 61, 65 (1974).
5. Б. И. Шкловский, А. Л. Эфрос, Электронные свойства легированных полупроводников, "Наука", М., 1979 г.
6. K. Minematsu, K. Miyatani, J. Phys. Soc. Jap., 31, 123 (1971).
7. K. Kodama, T. Niimi, Jap. J. Appl. Phys., 19, 307 (1980).
8. К. П. Белов, Л. И. Королева, М. А. Шалимова, ЖЭТФ, 74, 2244 (1978).