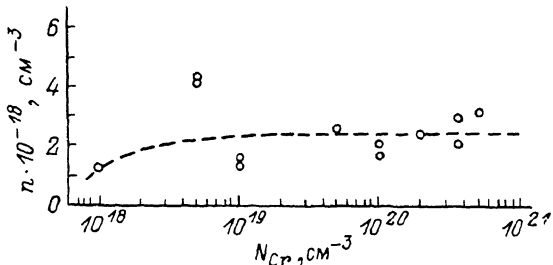


РЕЗОНАНСНЫЙ ДОНОРНЫЙ УРОВЕНЬ ХРОМА
В СЕЛЕНИДЕ РТУТИГлузман Н. Г., Леринман Н. К., Сабирзянова Л. Д.,
Цидильковский И. М., Паранчич С. Ю., Паранчич Ю. С.

Измерены концентрации и подвижности электронов бесщелевых кристаллов HgSe в зависимости от содержания в них хрома. Экспериментальные данные позволяют предположить, что атомы хрома образуют резонансный донорный уровень.

В последние несколько лет внимание привлек к себе новый бесщелевой полумангнитный полупроводник HgFeSe, в котором вместо традиционного марганца магнитным ионом является железо. Ионы Fe^{2+} ($3d^6$) являются примесями замещения в решетке HgSe и представляют собой нейтральные доноры. В отличие от ионов Mn^{2+} они образуют в зоне проводимости HgSe узкий донорный уровень на расстоянии ≈ 0.21 эВ от ее дна. У HgFeSe обнаружен целый спектр «аномальных» свойств, которые, как сейчас общепризнано, определяются, согласно идее Мыцельского^[1], кулоновской корреляцией

Рис. 1. Зависимость концентрации электронов n от концентрации атомов хрома N_{Cr} ($T = 4.2$ К).



между трехвалентными ионами Fe^{3+} , образующимися в результате автоионизации ионов Fe^{2+} . Эта корреляция приводит к упорядочению ионов Fe^{3+} , т. е. к образованию локализованного вигнеровского кристалла заряженных ионов (см., например, [2]).

Представляло интерес выяснить, является ли железо единственным ионом, обуславливающим появление донорного уровня в HgSe. С этой целью мы предприняли исследование основных кинетических характеристик кристаллов HgSe, легированных хромом. У хрома ($3d^4s^1$) ионные радиусы Cr^{2+} и Cr^{3+} равны 0.83 и 0.64 Å, т. е. примерно такие же, как и Fe^{2+} (0.80 Å) и Fe^{3+} (0.67 Å). Электроотрицательности ионов Cr^{2+} (1.4) и Cr^{3+} (1.5) также близки к соответствующим значениям для Fe^{2+} и Fe^{3+} . Это позволяет думать, что в HgSe атомы хрома, как и атомы железа, могут быть примесями замещения.

На кристаллах $Hg_{1-x}Cr_xSe$ ($5 \cdot 10^{-5} \leq x \leq 3 \cdot 10^{-2}$) были измерены коэффициент Холла R и удельное сопротивление ρ при температурах $1.4 \leq T \leq 300$ К, осцилляции Шубникова—де-Гааза поперечного магнитосопротивления при $T = 1.4 \div 30$ К в магнитных полях до 60 кЭ. Определены температурные зависимости концентраций и подвижностей электронов, а также их эффективные массы, температуры Дингла.

На рис. 1 представлена зависимость концентрации электронов n от концентрации атомов хрома N_{Cr} . Несмотря на заметный разброс значений n , можно утверждать, что концентрация электронов стабилизируется на уровне $n \approx 2.5 \times$

$\times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Заметим, что у кристаллов $\text{Hg}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}$ разброс значений n в области стабилизации значительно меньше [3]. Постоянство n при увеличении N_{Cr} выше $\sim 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ дает основание заключить, что, как и в HgFeSe , уровень Ферми ϵ_F фиксируется на донорном уровне хрома. Зная эффективную массу электронов и считая, что форма зоны проводимости вблизи ϵ_F такая же, как

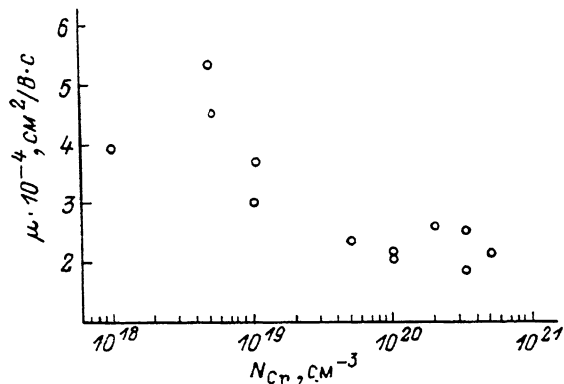


Рис. 2. Зависимость подвижности электронов μ от концентрации атомов N_{Cr} ($T = 4.2 \text{ K}$).

согласно которому уровень хрома должен располагаться ниже уровня железа.

Для всех образцов наблюдается некоторое уменьшение n с ростом T от 4.2 до 300 K (для образца с $N_{\text{Cr}} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ уменьшение n наибольшее — 19%). Эта зависимость $n(T)$ может быть объяснена изменением расстояния уровня хрома, генетически не связанного с зоной проводимости, относительно края зоны Γ_8 , который смещается с температурой, как и в случае HgFeSe [4].

На рис. 2 представлена зависимость подвижности электронов μ от концентрации N_{Cr} . Для двух образцов с $N_{\text{Cr}} \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ μ достигает $4.5 \cdot 10^4$ и $5.3 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, т. е. заметно превышает подвижность μ для образцов HgSe с такой же концентрацией электронов $\mu = 3.0 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, тогда как для образца с $N_{\text{Cr}} = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ подвижность $\mu = 3.9 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ точно совпадает с величиной μ для HgSe [5]. Этот экспериментальный факт увеличения подвижности μ при легировании HgSe хромом также служит подтверждением предположения о том, что

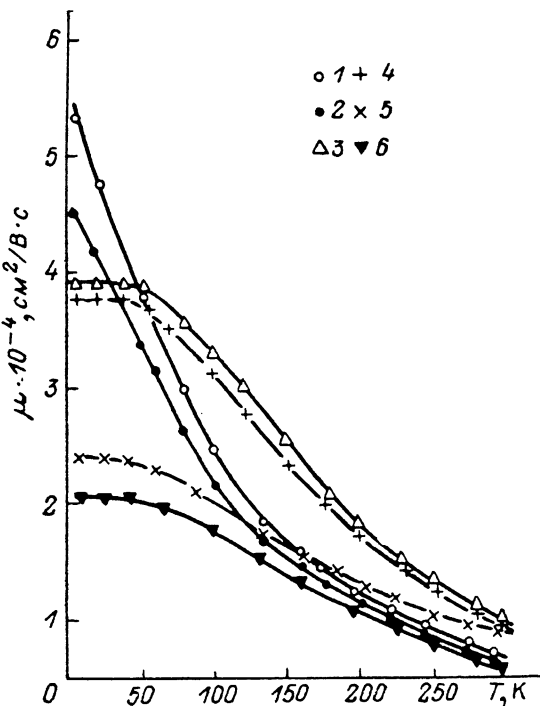


Рис. 3. Зависимость подвижности электронов μ от температуры.

$N_{\text{Cr}}, \text{ см}^{-3}$: 1, 2 — $5 \cdot 10^{18}$; 3 — $1 \cdot 10^{18}$; 4 — 1×10^{19} ; 5 — $5 \cdot 10^{18}$; 6 — $5 \cdot 10^{20}$.

хром, как и железо, образует донорный уровень на фоне зоны проводимости. Кулоновская корреляция между ионами Cr^{3+} обуславливает их упорядочение, что и приводит к уменьшению вероятности рассеяния электронов. Увеличение μ при увеличении содержания хрома от $1 \cdot 10^{18}$ до $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (к сожалению, промежуточных точек нет) является еще одним свидетельством в пользу предположения о возможном образовании ионами Cr^{3+} локализованного вигнеровского кристалла. Убывание $\mu(N_{\text{Cr}})$ при $N_{\text{Cr}} > 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ может быть обусловлено, как и в HgFeSe , сплавным рассеянием.

Температурные зависимости подвижности μ некоторых образцов показаны на рис. 3. Обращает на себя внимание вид кривых $\mu(T)$. Для образцов с $N_{Cr} \approx 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ подвижность монотонно убывает с ростом температуры, начиная с $T = 4.2 \text{ К}$. Для других образцов в области достаточно низких температур подвижность постоянна. Монотонное возрастание подвижности при понижении температуры для образцов с $N_{Cr} \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ также может свидетельствовать об упорядочении ионов Cr^{3+} и уменьшении вследствие этого вероятности рассеяния электронов.

Эффективные массы электронов, определенные по температурным зависимостям амплитуд шубниковских осцилляций, несколько различаются для образцов с разными N_{Cr} и находятся в пределах $(0.05 - 0.07) m_0$. Температура Дингла T_D как функция N_{Cr} имеет слабый минимум для образцов с $N_{Cr} \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в полном соответствии с изменением подвижности $\mu(N_{Cr})$.

Итак, особенности исследованных зависимостей $n(N_{Cr})$, $\mu(N_{Cr})$, $T_D(N_{Cr})$, $\mu(T)$ и $n(T)$ в основных чертах аналогичны соответствующим зависимостям для кристаллов HgFeSe . Более слабое возрастание $\mu(N_{Cr})$ при изменении N_{Cr} от $1 \cdot 10^{18}$ до $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, чем в HgFeSe , и более слабая сравнительно с HgFeSe стабилизация $n(N_{Cr})$ позволяют думать, что уровень хрома в кристаллах HgSe значительно шире, чем уровень железа. Возможно, это связано с магнитным взаимодействием между ионами Cr^{2+} , которые в отличие от ионов Fe^{2+} обладают магнитным моментом. Уширение уровня хрома в зону может явиться причиной заметного большего разброса концентраций n (рис. 1), чем наблюдается у HgFeSe . Действительно, вследствие хаотического распределения ионов Cr^{2+} ширина уровня, определяемая взаимодействием между ионами, может колебаться от образца к образцу, и, следовательно, уровень Ферми может фиксироваться при несколько различающихся значениях энергии. Вместе с тем нельзя сбрасывать со счетов и тот важный факт, что хром хуже растворяется в HgSe , чем железо, и межузельные атомы хрома могут создавать локальные неоднородности в кристалле. Эти несовершенства кристаллов могут явиться причиной вариации концентрации электронов от образца к образцу.

Список литературы

- [1] Mycielski J. // Sol. St. Commun. 1986. V. 60. N 2. P. 165—168.
- [2] Цидильковский И. М. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 4. С. 593—609.
- [3] Глузман Н. Г., Сабирзянова Л. Д., Цидильковский И. М., Паранчич С. Ю., Паранчич Л. Д. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 11. С. 1994—1997.
- [4] Pool F., Kossut J., Debska V., Reifengerger R. // Phys. Rev. B. 1987. V. 35. N 8. P. 3900—3909.
- [5] Dietl T., Szymanska W. // J. Phys. Chem. Sol. 1978. V. 39. N 10. P. 1041—1057.

Институт физики металлов УрО АН СССР
Свердловск

Получена 24.08.1990
Принята к печати 10.09.1990