

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЩЕЛЕВОГО ХАРАКТЕРА ЭЛЕКТРОННОГО СПЕКТРА НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ СПЛАВОВ В ОБЛАСТИ СТРУКТУРНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

*А.С.Шербаков, А.Ф.Прекул, Н.В.Волкенштейн*

Обсуждается поведение магнитосопротивления вблизи порогов подвижности. Показано, что при переходе уровня Ферми через энергетическую щель изменяется знак магнитосопротивления. Проведены измерения магнитосопротивления в системе сплавов  $Ti_{1-x} - Cr_x$ ; показано, что в электронном спектре этой системы в области структурной неустойчивости имеется сильная особенность типа щели по подвижности. Предполагается наличие такой особенности во всех бинарных сплавах на основе  $Ti$  с кубическими переходными металлами. Предлагается использовать магнитосопротивление для измерения параметра щели в тех случаях, когда это трудно сделать прямыми методами.

Как известно [1, 2] существует большая группа бинарных систем, включающая сплавы  $Ti$ ,  $Zr$  и  $Hf$  с кубическими переходными металлами характеризующаяся рядом общих аномалий в кинетических и структурных свойствах. Наиболее яркими особенностями в кинетических свойствах являются резкое возрастание остаточного сопротивления вблизи некоторой концентрации  $x_{кр}$  и изменение знака температурного коэффициента сопротивления при переходе через эту концентрацию. Согласно структурным данным [4] эта концентрация является благоприятной для образования в сплавах  $\omega$ -фазы.

Обе эти аномалии подробно исследовались в ряде работ [1 - 3], однако, причина их появления, по-видимому, до сих пор остается невыясненной. В [5] на основе анализа электросопротивления, коэффициента Холла и ТЭДС сплавов системы  $Ti_{1-x} - V_x$  было сделано предположение о возможном существовании щели в спектре электронов проводимости. Такое предположение позволяет с единых позиций объяснить наблюдаемые аномалии, включая указанные выше. Вместе с тем, наличие такой особенности в плотности электронных состояний бинарной системы, исходными компонентами которой являются металлы, не может быть очевидным и безусловно нуждается в экспериментальном подтверждении. Здесь, однако, возникают значительные трудности, связанные с малой величиной щели. Оценки, сделанные из данных по электропроводности дают для нее величину порядка  $10^{-2}$  эв. Таким образом, предполагаемая щель оказывается практически недостижимой для оптической спектроскопии.

В этой статье мы покажем, что имеется другая возможность подтвердить появление щели (или глубокой псевдощели) из измерений магнитосопротивления и продемонстрируем наличие такой особенности в плотности состояний указанных сплавов на примере системы  $Ti_{1-x} - Cr_x$ .

Существует общая причина возникновения магнитосопротивления [6], не связанная с конкретными механизмами рассеяния электронов про-

димости. Магнитное поле увеличивает или уменьшает (в зависимости от направления спина) энергию Ферми на величину  $\pm \mu_B H$ , где  $\mu_B$  — магнетон Бора. Если проводимость электронов определяется их граничной энергией, то в присутствии магнитного поля изменение проводимости примет вид

$$\delta \sigma = \frac{1}{2} \sigma''(E_F) (\mu_B H)^2, \quad (1)$$

где  $\sigma''(E_F)$  — вторая производная от проводимости по энергии, взятая на уровне Ферми. Из этого выражения легко видеть, что: а) в силу малости величины  $(\mu_B H)^2$  эффект магнитосопротивления реально может наблюдаться только при условии сильной зависимости проводимости (плотности состояний, подвижности носителей) от положения уровня Ферми (рис. 1), б) знак эффекта определяется положением уровня Ферми относительно соответствующей особенности в плотности состояний. Последнее обстоятельство является наиболее существенным, так как именно изменение знака магнитосопротивления при увеличении энергии Ферми с положительного на отрицательный означает наличие щели (или глубокой псевдощели) в плотности состояний. Следует заметить, что неглубокий минимум в плотности состояний может привести только к отрицательному магнитосопротивлению, так как в этом случае  $\sigma''(E_F) > 0$ .

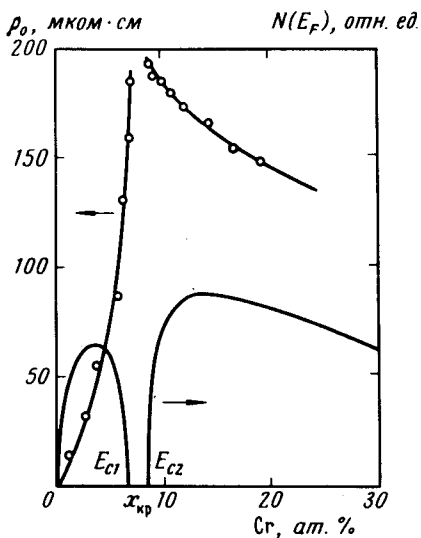


Рис. 1. о — Поведение остаточного сопротивления сплавов  $Ti_{1-x}Cr_x$ , сплошная линия — предполагаемое поведение плотности состояний

Таким образом, если мы имеем возможность с помощью внешнего параметра, например, концентрации, менять положение уровня Ферми, то вблизи  $x_{кр}$  (рис. 1) можно надеяться наблюдать магнитосопротивление, связанное с выражением (1). При этом эффект будет положительным при  $E_F \approx E_{c1}$  и отрицательным при  $E_F \approx E_{c2}$ . Величина эффекта должна быстро убывать при удалении от  $x_{кр}$  в обе стороны (рис. 1).

Для экспериментальной проверки описанной выше возможности были выполнены измерения магнитосопротивления сплавов  $Ti_{1-x} - Cr_x$  ( $x = 4,3; 6,12; 6,4; 7; 8; 9,8$  и  $11,3$  ат. %) в полях до  $200$  кэ при температурах  $T = 4,2$  и  $20,4$ К. На рис. 2 приведены результаты измерений для двух образцов —  $6,12$  и  $6,8$  ат. % Cr. Как и ожидалось, образцы разделились на две группы по знаку эффекта.

Что касается величины эффекта, то при экспериментально наблюдаемом изменении сопротивления  $\Delta\rho_H/\rho_0 \sim 0,2\%$  в поле  $H = 2 \cdot 10^5$  эс и  $\rho_0 = 200$  мком·см проводимость при  $E_F = E_{c1}$  (или  $E_{c2}$ ) должна меняться примерно в  $10^3$  раз. По порядку величины и по смыслу такое изменение соответствует обсуждаемому в [6] скачку подвижности.

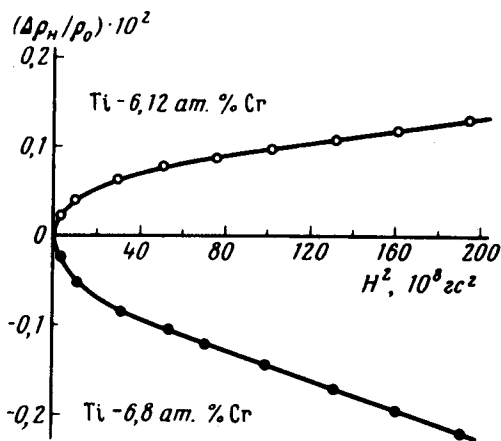


Рис. 2

Концентрационная зависимость магнитосопротивления в поле  $H = 150$  кэ при  $T = 4,2$  и  $20,4$ К приведена на рис. 3. Такая зависимость для сплавов получена впервые, и, по-видимому, может быть не только качественной, но и количественной характеристикой щели. В этом случае в качестве параметра щели естественно принять расстояние между экстремумами кривой рис. 3. Как видно из рисунка, эти экстремумы выражены достаточно четко, что позволяет измерить ширину щели с хорошей точностью. Из данных по К-эмиссионным спектрам [7] можно определить величину  $dE_F/dx$ . Для системы  $Ti_{1-x} - Cr_x$  эта величина составляет  $0,016$  эв/ат.%. Тогда из рис. 3 параметр щели оказывается равным  $0,014$  эв, что находится в хорошем согласии с этой величиной, найденной из данных по электропроводности в предположении полупроводникового характера проводимости.

Таким образом, полученные результаты можно рассматривать как экспериментальное подтверждение сделанного в [5] предположения о характере электронного спектра в сплавах на основе титана и сделать следующие выводы: 1) в электронном спектре рассматриваемых бинарных систем, в частности, в системе  $Ti_{1-x} - Cr_x$  в области структурной неустойчивости появляется сильная особенность типа щели или щели по подвижности; эта особенность проявляется в специфическом поведении концентрационной зависимости магнитосопротивления (рис. 3); 2) маг-

нитоспротивление может быть использовано в качестве инструмента для определения параметра щели в тех случаях, когда это трудно сделать прямыми методами, при этом точность измерения ограничивается только точностью определения состава образцов и величины  $dE_F/dx$ .

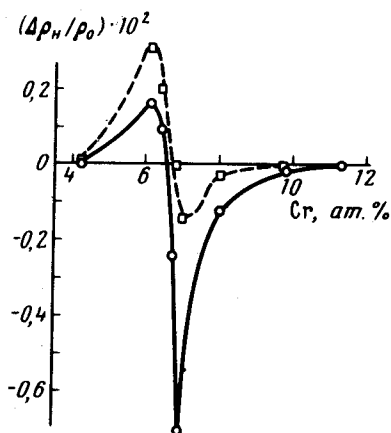


Рис. 3.  $\circ$  — Магнитосопротивление в поле  $150 \text{ кэ}$  при  $T = 4,2 \text{ К}$ .  
 $-\square-$  — то же при  $T = 20,4 \text{ К}$

Эта работа выполнена в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур, г. Вроцлав, Польша.

Авторы благодарят Н.Е.Алексеевского и Ч.Э.Базана за предоставленную возможность проведения исследований. Один из авторов (А.С.Щ.) благодарит Б.Рончку за помощь в работе.

Институт физики металлов  
 Академии наук СССР  
 УНЦ

Поступила в редакцию  
 16 октября 1977 г.

### Литература

- [1] А.Ф.Прекул, А.С.Шербаков, Н.В.Волкенштейн, ФНТ, 2, 1399, 1976.
- [2] А.Ф.Прекул, В.А.Рассохин, Н.В.Волкенштейн. ЖЭТФ, 67, 2286, 1974.
- [3] R.R.Nake, D.H.Leslie, T.G.Berlincourt. Phys. Rev., 127, 170, 1962.
- [4] Г.И.Носова. Фазовые превращения в сплавах титана, М., 1968 г.
- [5] В.А.Рассохин, Н.В.Волкенштейн, А.Ф.Прекул. Материалы Всесоюзного совещания по физике низких температур (НТ-19), Минск, 1976 г.
- [6] Н.Мотт, Э.Дэвис. Электронные процессы в некристаллических веществах, М., изд. Мир, 1974 г.
- [7] С.А.Немнонов, Э.З.Курмаев. Сб. "Проблемы сверхпроводящих материалов", М., изд. Наука, 1970 г.