

О ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СПЛАВОВ Mo-Re, Mo-Re-Nb

Т.А. Игнатъева, А. Н. Великодный, А.А. Саньков

*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",
61108, г Харьков, Украина, ул. Академическая, 1*

Исследованы температурные зависимости удельного сопротивления $\rho(T)$ в интервале температур 10...300 К для двойных сплавов $Mo_{1-x}Re_x$ (0...30) ат.% Re и тройных сплавов $Mo_{1-x-y}Re_xNb_y$, где суммарная концентрация примесей соответствовала твердому раствору. Наблюдали нелинейное увеличение $\rho(T)$ в двойных и тройных сплавах. Удельное сопротивление, как функция концентрации $-\rho(C)$ при $T = 10$ К, нелинейно растет для двойных систем и нелинейно убывает для тройных. Это соответствует появлению малой электронной полости поверхности Ферми в Mo под действием примеси Re и ее исчезновению в двойной системе под действием примеси Nb. Перестройка электронного спектра может привести к особенностям электрон-фононного взаимодействия, по нашему предположению это соответствует нелинейности идеального сопротивления $\rho_i(C)$ двойных систем при $T = \text{const}$ выше 30 К.

Результаты исследований электронно-топологических переходов (ЭТП) в переходных металлах и их сплавах показали, что небольшие изменения в структуре электронного спектра могут повлиять существенным образом на их физические характеристики [1-11]. Сплавы Mo-Re оказались хорошим модельным объектом для изучения тонкой структуры электронного спектра и ее проявления в различных характеристиках металлов. Кубическая структура Mo и достаточно большая область растворимости Re [12] с сохранением той же кристаллической структуры дали возможность провести широкий спектр исследований этих систем и сопоставить результаты с точки зрения особенностей электронного спектра этих сплавов. Были подробно изучены особенности сверхпроводящих характеристик и термоэ.д.с. сплавов $Mo_{1-x}Re_x$ ($Mo-Re$) $_{1-y}Nb_y$ при ЭТП, который идентично проявлялся в сверхпроводящих и нормальных свойствах в виде экстремумов зависимостей $\frac{\partial T_c}{\partial P}(C)$ [10] и $\alpha(C)$ [11], где T_c , α , P и C – это температура сверхпроводящего перехода, термоэ.д.с., давление и концентрация примеси. В этих работах было отмечено, что особенности плотности электронных состояний $\nu(E)$ являются одним из основных факторов, влияющих на физические характеристики металлов. Вопрос о влиянии ЭТП на концентрационную зависимость электросопротивления $\rho(C)$ теоретически рассматривался в работах [13-14] и для ряда сплавов экспериментально в [15-16] и др.

В данной работе проведены экспериментальные исследования температурной зависимости удельного сопротивления двойных и тройных сплавов Mo-Re и Mo-Re-Nb в широкой области температур и той области концентраций, где наблюдается ЭТП в этих системах под действием примеси.

Исследовались те же образцы, что и в работе [11] при изучении термоэ.д.с. этих систем, приготовление образцов подробно описано в этой работе. Измерения проводились потенциометрическим методом в приборе для промежуточных температур. Температура измерялась угольным термометром сопротивления в области температур от 10 до 30 К с точностью 0,1 К, при более высоких погрешность составляла не более 1 К. Результаты измерений $\rho(T)$ для двойных систем Mo-Re и тройных Mo-Re-Nb приведены на рис.1 и 2 соответственно.

Как известно, сопротивление является аддитивной функцией: $\rho = \rho_r + \rho_i$, где ρ_r – остаточное сопротивление, ρ_i – идеальное удельное сопротивление, обусловленное различными механизмами рассеяния электронов фононами. На рис 1, б, 2, б показана отдельным фрагментом низкотемпературная область зависимости $\rho(T)$ в интервале температур 10...50 К. Из этих графиков видно, что переход от остаточного сопротивления к ρ_i происходит при $T > 30$ К. Остаточное сопротивление ρ_r определяется рассеянием электронов на примесях либо других дефектах и не зависит от температуры. ρ_r пропорционально концентрации примеси и обратно пропорционально $\nu(E)$. Для большинства металлов эта область температур соответствует $T < 10$ К. Для переходных металлов со сложной электронной структурой при низких температурах могут проявляться особенности электронного спектра $\nu(E)$ и в температурной зависимости удельного сопротивления $\rho(T)$ [17].

По литературным данным, это может привести к отрицательной составляющей температурного хода удельного сопротивления, что является одним из возможных объяснений минимума сопротивления [18]. При температурах $T > 30$ К сопротивление

определяется процессами рассеяния электронов на фонах. Разделить влияние электронной и фоновой подсистем на температурный ход сопротивления трудно.

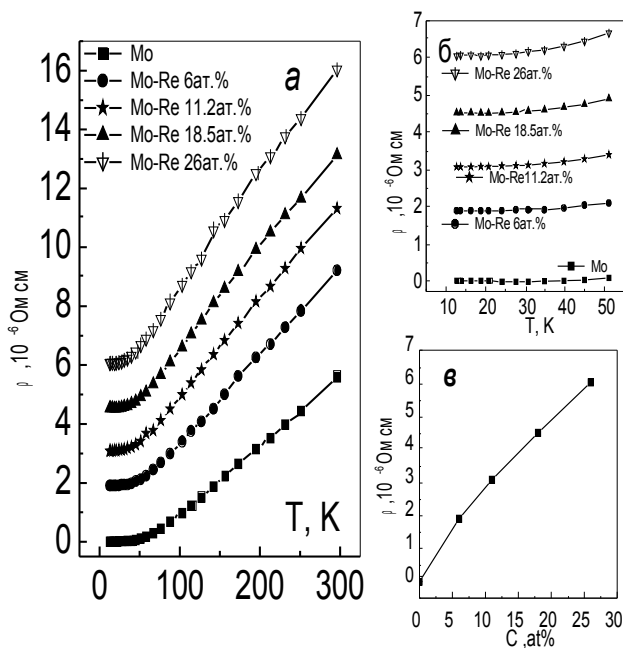


Рис.1. Зависимость удельного сопротивления ρ от температуры сплавов Mo-Re (а); зависимость $\rho(T)$ Mo-Re в интервале температур 10...50 K (б), зависимость $\rho(C)$ Mo-Re при 10 K (в)

В то же время, это возможно сделать, исследуя твердые растворы, где кристаллическая структура сохраняется, а электронный спектр изменяет свою топологию. В системе Mo-Re наблюдали появление электронной группы под действием примеси рения, а в тройной системе Mo-Re-Nb уничтожение этой группы под действием примеси Nb [10,11]. Такой электронно-топологический переход проявляется как нелинейность в зависимостях $\rho(C)$ при $T=Const$ в области низких температур. Этот результат приведен на рис.1, в и 2, в для двойной и тройной систем. На фоне роста сопротивления наблюдается нелинейность, соответствующая особенностям $\nu(E)$. В одном случае нелинейный рост - это появление электронной полости в Mo под действием примеси Re, в другом - нелинейное уменьшение - это исчезновение этой полости в Mo-Re под действием примеси Nb. Эти зависимости соответствуют сечению при $T = 10$ K зависимостей $\rho(T)$ (см. рис 1,б) для различных концентраций Mo-Re и на рис 2,б - для различных эффективных концентраций тройных систем Mo-Re-Nb. Эффективные концентрации тройных систем соответствуют электронным и рассчитаны с учетом валентности примесей Re и Nb относительно Mo ($\Delta Z = \pm 1 \text{ эл} / \text{ат}$).

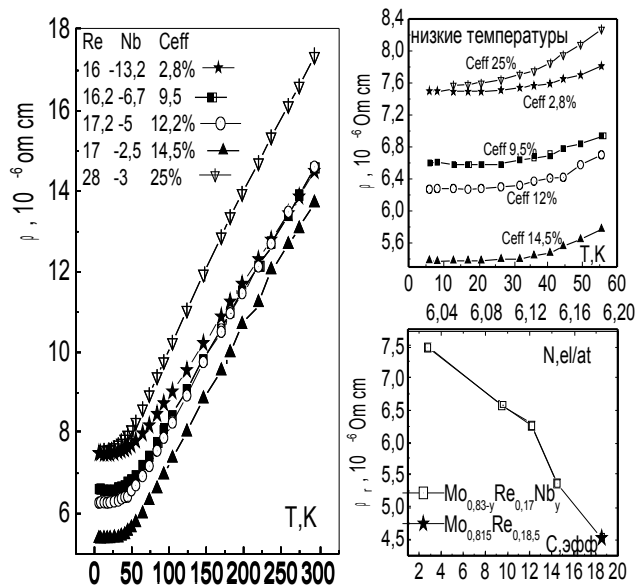


Рис.2. Зависимость удельного сопротивления ρ от температуры сплавов Mo-Re-Nb (а), зависимость $\rho(T)$ Mo-Re-Nb в интервале температур 10...50 K (б), зависимость $\rho(C_{эфф})$ Mo-Re-Nb при 10 K (в)

Сравнивая эти зависимости между собой и с данными [10,11], видно, что они соответствуют упомянутым ЭТП.

Как видно из графика (см. рис. 1 и 2), при температурах выше 30...40 K, удельное сопротивление начинает зависеть от температуры. Интересно отметить, что в тройных системах, где остаточное сопротивление при одинаковых электронных концентрациях по отношению к двойным системам выше, фоновые процессы рассеяния начинают проявляться при меньших температурах, чем в двойных системах - 20...30 K.

Возникает вопрос о проявлении ЭТП в области температур, где уже проявляются фоновые механизмы рассеяния электронов.

Такое проявление можно заметить, построив зависимость идеального сопротивления $\rho_i(C)$ при $T = const$ для различных значений температур (сечение на рис.1,а и 2,а). Из приведенных таких результатов (рис.3, 4) видно, что идеальное сопротивление ρ_i растет при увеличении концентрации примеси. Скорость роста зависит от температуры, а на кривой зависимости идеального сопротивления от содержания примеси рения $\rho_i(C)$ при постоянной температуре появляется немонотонность в той же области концентраций, где проявляется ЭТП (см. рис.3, 4). Это обозначает, что вблизи критической концентрации рения C_c появляется механизм, компенсирующий плавный рост сопротивления Эта особенность (см. рис.3) более отчетливо проявляется при повышении тем-

температуры вплоть до комнатной. Это приводит к мысли, что причиной может служить, как уже отмечалось, с одной стороны, изменение топологии поверхности Ферми молибдена под действием примеси рения, с другой, – как следствие перестройки электронного спектра, возможное изменение фононного механизма рассеяния электронов, изменение электрон-фононного взаимодействия.

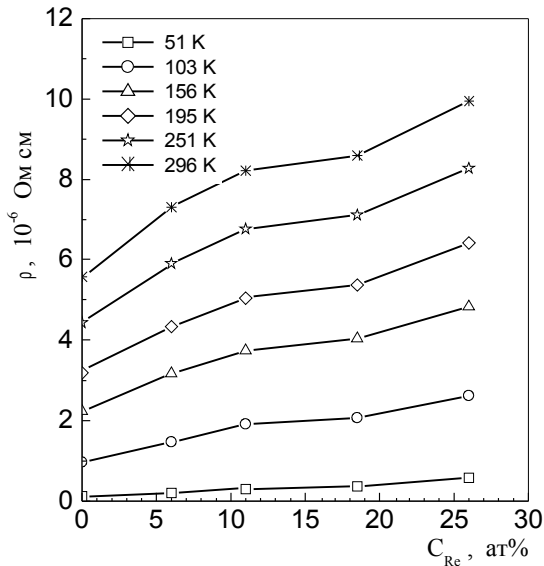


Рис. 3. Зависимость идеального удельного сопротивления ρ_i от концентрации при различных температурах сплавов Mo-Re

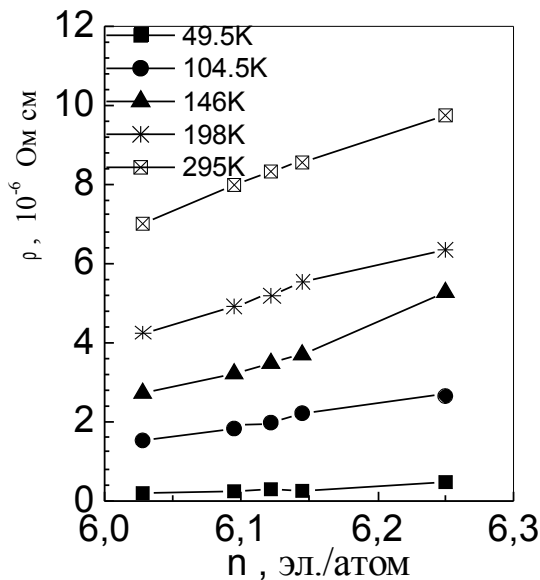


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления ρ от электронной концентрации при различных температурах сплавов Mo-Re-Nb

Сравнивая результаты $\rho_i(C)$ двойных и тройных систем, можно отметить, что эти особенности наблюдаются при эквивалентных электронных

концентрациях, но различных остаточных сопротивлениях. Это подтверждает то, что природа особенности механизма рассеяния при $T > 30$ К связана с изменением плотности электронных состояний и возможно характера взаимодействия электронов с фононами при ЭТП.

Таким образом, в работе на примере твердых растворов Mo-Re и Mo-Re-Nb показано, что перестройка электронного спектра проявляется как нелинейность в зависимости остаточного сопротивления $\rho_r(C)$ при температурах до 10 К и в зависимости идеального удельного сопротивления $\rho_i(C)$ при температурах $T = \text{const}$ выше 30 К. Представленные результаты показывают, что при повышении температуры нелинейность $\rho_i(C)$ сохраняется. Это отчетливо видно в концентрационной зависимости идеального удельного сопротивления ρ_i при температурах выше 100 К. Мы предполагаем, что это связано с особенностями электрон-фононного взаимодействия при изменении структуры электронного спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. I.D.L.Davidson, F.R.Brotzen. Elastic Constants of Molybdenum- Rich Rhenium Alloys in The Temperature Range-190...100°C // *Journal of Applied Phisics*. 1968, v. 39, № 12.
2. В.Г.Барьяхтар, В.В.Ганн, В.И.Макаров, Т.А.Игнатъева. Влияние изменения топологии поверхности Ферми на сверхпроводящие свойства // *Журнал эксперим.и теорет. физики*, 1972, т.62, в.3, с.1118-1128.
3. W. Royal Cox, D.J.Hayes, F.R.Brotzen. Temperature dependence of the Hall effect and resistivity in single crystals of Mo and Nb and Mo-rich-Re, Mo-Nb, and Nb-rich-Zr alloys // *PhysRev.B*. 1973, v.7, №8, p.3580-3588.
4. R.J. Iverson, L.Hodges. Molybdenum: band structure, Fermi surface and spin-orbit interaction // *Phys. Rev. B*. 1973, v.8, №4, p.1429-1432.
5. D.D.Koelling, F.M.Muelle, A.I.Arko, J.B.Ketterson. Fermi surface and electronic density of states of molybdenum // *Phys. Rev. B*. 1974, v.10, №12, p.4889-4896.
6. A.R. Jani, G.S.Tripathi, N.E.Brener, J.Callaway. Band structure and related properties of molybdenum // *Phys. Rev. B*. 1989, v.40, №3, p.1593-1602.
7. В.И. Макаров, В.З.Клейнер, Т. А. Игнатъева. О про явлении фазовых переходов $2^{1/2}$ рода в элктронных свойствах α - урана и кадмия // *Физика низких температур*. 1979, т.5, № 9, с.1022-1034.
8. Т.А.Игнатъева, Ю.А. Черевань. Об особенностях изменения температуры сверхпроводя-

- щего перехода под давлением в твердых растворах Mo-Re // *Письма в ЖЭТФ*. 1980, т.31, в.7, с.389-392.
9. М.И.Каганов, Ю.В.Грибкова. Топологические переходы в нормальных металлах // *ФНТ*. 1991, т.17, №8, с.907-932.
 10. Т.А. Игнатъева, В.В. Ганн, А.Н. Великодний. Исследование электронно-топологических переходов в сверхпроводящих сплавах Mo-Re, Mo-Re-Nb. // *Физика низких температур*. 1994, т. 20, № 11, с.1133-1141.
 11. Т.А. Игнатъева, А.Н. Великодний. Особенности термоэдс сплавов Mo-Re, Mo-Re-Nb и электронно-топологический переход в этих системах. // *Физика низких температур*. 2002, т. 28, №6, с.569-579.
 12. Н.В. Агеев, В.Ш.Шехтман. Рентгенографическое исследование сплавов рения с молибденом // *Известия АН СССР. Серия физическая*. 1959, т.23, №5, с.650-651.
 13. В.Г.Вакс, А.В.Трефилов А.В., С.В.Фомичев. Об особенностях электросопротивления и термоэдс металлов при фазовых переходах 2,5 рода // *ЖЭТФ*. 1981, т.80, в.4, с.1613-1621.
 14. А.А.Абрикосов, А.В.Панцулая. Об особенностях термоэдс при топологическом переходе Лифшица // *ФТТ*. 1986, т.28, в.7, с.2140-2144.
 15. В.С.Егоров, С.А.Варюхин. Аномалии термоэдс и сопротивления сплавов кадмий-магний при низких температурах // *Письма в ЖЭТФ*. 1984, т.39, в.11, с.510-513
 16. Н.Б.Брандт, В.С.Егоров, М.Ю.Лавренюк и др. Особенности термоэдс и сопротивления при электронных топологических переходах в висмуте и его сплавах // *ЖЭТФ*. 1985, т.89, в.6(12), с. 2257-2268.
 17. Н.В.Волкенштейн, В.А.Новоселов, В.Е.Старцев. Роль межэлектронных столкновений в электросопротивлении переходных металлов // *ЖЭТФ*. 1971, т.60, № 3, с.1078-1085.
 18. М.А.Howson, В.Л.Gallagher The electron transport properties of metallic glasses // *Physics Reports (Review Sections of Physics Letters)* 1988, v.170, № 5, p. 298-300.

ПРО ТЕМПЕРАТУРНУ ЗАЛЕЖНІСТЬ ПИТОМОГО ОПОРУ СПЛАВІВ Mo-Re, Mo-Re-Nb

Т.О. Ігнатъєва, О.М.Великодний, А.А.Саньков

Досліджено температурні залежності питомого опору $\rho(T)$ в інтервалі температур 10К...300 К для подвійних $Mo_{1-x}Re_x$ (0...30) ат.%та потрійних сплавів $Mo_{1-x-y}Re_xNb_y$, де сумарна концентрація домішок відповідала твердому розчину. Спостерігали нелінійне зростання $\rho(T)$ в подвійних та потрійних сплавах. Питомий опір, як функція концентрації $\rho(C)$ при $T=10$ К, нелінійно зростає для подвійних систем та нелінійно зменшується для потрійних. Це відповідає появленню малої електронної групи поверхні Фермі в Мо під дією домішки Re та її зникненню в подвійній системі під дією домішки Nb. Зміна електронного спектру може визвати особливості електрон-фононої взаємодії, по нашому уявленню, саме з цим пов'язана нелінійність ідеального опору $\rho_i(C)$ подвійних систем при $T=const$ більших 30 К.

ABOUT TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE RESISTIVITY OF Mo-Re, Mo-Re-Nb ALLOYS

T.A.Ignatyeva, A.N.Velikodny, A.A. Sanikov

The temperature dependences of the resistivity $\rho(T)$ of $Mo_{1-x}Re_x$ alloys (Re concentrations between 0 and 30 at.% and $Mo_{1-x-y}Re_xNb_y$, where the total impurity concentration corresponded to solid solution, have been investigated in the temperature range (10...300) K. A nonlinear increase of $\rho(T)$ in two- and three- component alloys has been observed. The function $\rho(C)$ nonlinearly increases at $T=10$ K for the two-component systems and nonlinearly decreases for the three-component systems. It corresponds to appearance of a small electronic group of the Fermi surface in Mo under the action of Re impurity and to the disappearance of this group in the $Mo_{1-x}Re_x$ systems doped with Nb. The change in the electronic spectrum may lead to some peculiarities in the electron - phonon interaction. To our assumption this corresponds to nonlinearity in the ideal resistivity $\rho_i(C)$ of two -component systems at $T=const$ above 30K.