

УДК 537. 312 536.2.

ВЛИЯНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОННОГО СПЕКТРА НА ПОДВИЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В МО И СПЛАВАХ МО - RE**Т.А. Игнатъева, А.Н. Великодний***Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
ул. Академическая, 1, Харьков, 61108, Украина**E-mail: taignatieva@mail.ru*

Received 25 December 2011, accepted 20 February 2012

Используя экспериментальные результаты по эффекту Холла для Мо и сплавов Мо-Re,[1] рассчитана температурная зависимость подвижности электронов. Результаты рассматриваются с учетом критических энергий электронного спектра Мо. Показано, что температуру $\sim 50\text{K}$ можно сопоставить с краем подвижности локализованных электронов на краю спектра в узком интервале энергий: от критических энергий - зарождения малых электронных групп до энергии активации, когда электроны делокализуются. Для Мо – это ϵ_{C1} энергия зарождения малой электронной линзы ниже уровня Ферми и ϵ_{C2} энергия выше уровня Ферми, при которой появляется новая электронная полость поверхности Ферми под действием примеси Re. Приведенные результаты свидетельствуют о том, что движение уровня Ферми под влиянием внешних воздействий относительно критических энергий электронного спектра приводит к электронно-топологическим переходам, которые одновременно имеют признаки переходов металл-диэлектрик.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подвижность электронов, критические энергии электронного спектра, край подвижности, электронно-топологический переход, локализация электронов.

INFLUENCE OF THE ELECTRONIC SPECTRUM FEATURES ON THE ELECTRON MOBILITY OF MO AND MO - RE ALLOY

T.A. Ignatyeva, A.N. Velikodnyy

*National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology"
Academichna str. 1, Kharkiv, 61108*

The of electrons mobilities adjusted for critical experimental results of the Mo and Mo-Re alloys Hall effect measurements [1] were used for the calculation temperature dependence energy of the Mo electronic spectrum. It was shown that the temperature of 50K could be related to the mobility edge of localized electron states at the spectrum edge in narrow energy interval; from critical energies, when generation of the small electronic groups took place, to activation energy attributed to electron delocalization. In the case of Mo - there are ϵ_{C1} energy of the generation of small electronic lens below Fermi level and ϵ_{C2} energy above Fermi level, which accompanied by the formation of new electronic cavity of the Fermi surfaces under Re doping. In summary, Fermi level movement, under external impact in relation to the critical energy of electron spectrum, led to electronic-topological transitions which simultaneously have the features of metal-dielectric transitions.

THE KEY WORD: mobility electron, critical energies of the electronic spectrum, edge to mobilities, electronic- -topological transition, electron localization.

ВПЛИВ ТОНКОЇ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОННОГО СПЕКТРУ НА РУХОМІСТЬ ЕЛЕКТРОНІВ В МО ТА СПЛАВАХ МО - RE**Т.О. Ігнатъєва, О.Н. Великодний***Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»,
вул. Академічна 1, Харків, 61108, Україна*

За експериментальними результатами ефекту Холла для Мо та сплавів Мо-Re [1], розрахована температурна залежність рухомості електронів. Результати аналізуються з врахуванням критичних енергій електронного спектру Мо. Показано, що температуру $\sim 50\text{K}$ можна віднести до краю рухомості локалізованих електронів на краю спектру у вузькому інтервалі енергій: від критичних енергій - зародження малих електронних груп до енергії активації, коли електрони де локалізуються. Для Мо – це ϵ_{C1} енергія зародження малої електронної лінзи нижче рівня Фермі та ϵ_{C2} - енергія вище рівня Фермі, при якій з являється нова електронна група під дією домішок Re. Наведені результати свідчать про те, що рух рівня Фермі відносно критичних енергій електронного спектру під впливом зовнішніх дій приведе до електронно-топологічних переходів, які одночасно мають ознаки переходів метал-діелектрик.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: рухомість електронів, критичні енергії електронного спектру, край рухомості електронно-топологічний перехід, локалізація електронів.

В настоящее время результаты фундаментальных исследований физических характеристик твердых тел интенсивно внедряются в практику. Интерес представляют физические характеристики, изменение которых под действием внешних параметров могут влиять на физические свойства твердых тел. Большинство из них связаны, в определенной мере, с тонкой структурой электронного спектра и электрон-фононным взаимодействием. В работе [1] проведены подробные исследования эффекта Холла Мо и его сплавов с примесями Re и Nb, в результате получены зависимости ряда кинетических характеристик от температуры и концентрации примесей. В то же время, полной ясности о природе особенностей этих характеристик не было.

Результаты работы [2], полученные на аналогичных образцах, показали, что проводимость σ молибдена в узком интервале температур до $\sim 50\text{K}$ резко уменьшается по экспоненте, при дальнейшем увеличении температуры наблюдается переход к более плавной степенной зависимости, переходящей к насыщению. Эти особенности требуют выяснения их природы, основываясь на результатах [1,2] с учетом тонкой структуры электронного спектра, особенностей, связанных с электронными переходами под действием внешних параметров и изменений динамики движения электронов при таких переходах.

Такие вопросы для твердых тел затронуты и в обзоре [3]. Рассмотрение переходов металл-диэлектрик, связанных с особенностями проводимости различных материалов при различных внешних условиях, привели авторов обзора [3] к выводу, что привычная классификация материалов - металлы, полупроводники, диэлектрики, по типу проводимости, определяемой заполнением электронных зон коллективизированными электронами, часто нарушается. Далее цитируем [3]: *«К середине шестидесятых годов появилось немало примеров, нарушающих описанную классификацию, аномальными оказались вещества, претерпевающие переход металл- диэлектрик, то есть имеющие свойства металлов при одних внешних условиях (температура, давление) и диэлектриков при других. Как правило, переход между этими двумя состояниями сопровождается резким изменением электропроводности и других физических свойств. К переходу металл – диэлектрик (ПМД) относятся также переход металл – полупроводник, полуметалл – полупроводник. Наиболее общепринятым является определение ПМД как перехода с изменением типа проводимости».*

Именно такие представления с учетом изменений топологии поверхности Ферми, а вернее при наличии условий, определяющих изменение положения уровня Ферми относительно критических точек электронного спектра, при которых происходит электронно-топологический переход ЭТП, можно привлечь при рассмотрении результатов данной работы.

В данной работе показаны особенности температурных зависимостей подвижности электронов для Mo и сплавов Mo-Re с использованием экспериментальных данных работы [1]. Эти результаты могут быть дополнением экспериментальных фактов к переходам ПМД в переходных металлах со сложной топологией поверхности Ферми в условиях ЭТП [4].

Молибден – это скомпенсированный металл (число электронов и дырок равны), В электронном спектре имеются две критические точки ε_{C1} и ε_{C2} , близкие к уровню Ферми ε_F ($\varepsilon_{C2} > \varepsilon_{C1}$) [5]. Изменение уровня Ферми под влиянием внешних воздействий относительно этих точек может привести к электронно-топологическим переходам [6,7]. По результатам комплексных исследований электронно-топологических переходов ЭТП Mo под влиянием примеси, давления, температуры [8-13] наблюдали появление новой электронной полости поверхности Ферми при пересечении ε_{C2} уровнем Ферми. При этом оказалось, что особенности плотности электронных состояний имеют сложный характер, а именно, на фоне корневой особенности $\delta\nu \sim \sqrt{\varepsilon_F - \varepsilon_C}$, присущей для сплошного спектра свободных электронов при ЭТП, наблюдаются «осцилляции» в узком интервале энергий [14]. Такая структура плотности электронных состояний характерна для электронов, «локализованных» на краю зоны при переходах металл-диэлектрик [15] и сохраняется до края подвижности, когда при удалении уровня Ферми от края зоны, а в случае ЭТП от критической точки электронного спектра, локализованные электроны приобретают свойства свободных.

Такие изменения энергетического состояния электронов в окрестности особых точек (Ван-Хова [16]) электронного спектра при ЭТП отражаются на динамике движения электронов, что существенно влияет на физические свойства. Например, при изучении ЭТП в системах Mo-Re к ним можно отнести резкий рост температуры сверхпроводящего перехода [17], увеличение термоэдс [9], изменение прочностных характеристик [18].

Существенно отметить, что параметр $\delta\nu/\nu(\varepsilon)$ (относительное изменение плотности электронных состояний при ЭТП), определенный в работах [8, 9], в Mo составляет $\sim 10^{-3}$, поэтому можно предположить, что столь существенные изменения физических характеристик Mo могут быть связаны и с другими изменениями при ЭТП, а именно с изменениями динамики движения электронов.

Одной из важных характеристик, отражающих изменение динамики движения электронов при ЭТП в окрестности критических точек, является подвижность электронов, которая зависит от эффективной массы, процессов рассеяния, электрон-фононного взаимодействия и определяет кинетические характеристики металлов.

Интересным объектом для таких исследований является Mo, у которого критическая энергия ε_{C1} ниже уровня Ферми соответствует малой электронной линзе. Эту критическую точку можно рассматривать как зарождение малой электронной полости поверхности Ферми, но при энергиях меньших уровня Ферми. Тогда свойства этих электронов должны быть аналогичны тем, которые образовали малую полость поверхности Ферми выше уровня Ферми Mo при ЭТП под действием 10at%Re при условии $\varepsilon_F = \varepsilon_{C2}$. Другими словами, предполагается, что динамика движения электронов малых групп имеет особенности, связанные с их локализованными состояниями в окрестности особых точек электронного спектра. Такие особенности проявляются в кинетических характеристиках, одной из которых является проводимость σ , связанная с подвижностью электронов μ следующим образом: $\sigma = en_e\mu_e$, где e – заряд электрона, n_e и μ_e – концентрация и

подвижность электронов соответственно.

В данной работе, используя экспериментальные результаты по эффекту Холла работы [1] и стандартные выражения для подвижности в двухзонной модели [19], получена температурная зависимость подвижности электронов для Mo и ряда сплавов Mo-Re в широком интервале температур.

Особенности температурной зависимости подвижности электронов в Mo и сплавах Mo-Re при изменении температуры и концентрации примеси Re в Mo в различных температурных интервалах позволяют судить о тонкой структуре электронного спектра этих систем.

Цель данной работы – показать, что при исследованиях кинетических характеристик проявляются особенности температурных зависимостей, которые можно отнести к прохождению уровня Ферми через порог подвижности, которому соответствует определенная температура для данного металла. Для Mo и его сплавов Mo-Re это температура 50K, при которой изменяется энергетическое состояние электронов малых групп, критические энергии которых близки к уровню Ферми, что ранее не отмечалось. Эту температуру можно идентифицировать как край подвижности электронов, локализованных на краю спектра или у дна зоны.

Особенности динамики движения электронов при ЭТП предлагается рассматривать в рамках представлений о переходах металл-диэлектрик. Таким образом, предполагается, что электронно-топологические переходы, связанные с критическими точками электронного спектра, сопровождаются изменением динамики движения электронов, характерными для переходов металл-диэлектрик.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе [1] приведены экспериментальные данные по эффекту Холла для Mo высокой степени чистоты и сплавов Mo-Re различных концентраций. Удельное сопротивление и другие параметры образцов приведены в работе [1]. Заметим, что значения удельного сопротивления ρ и результаты температурной зависимости $\rho(T)$ для идентичных образцов, исследуемых в работах [10-12] находятся в хорошем согласии с результатами [1].

В данной работе были рассчитаны температурные зависимости подвижности электронов Mo и его сплавов по результатам эффекта Холла работы [1], используя двухзонную модель [19]:

$$\frac{1}{\rho} = \sigma = N_a |e| (n_e \mu_e + n_h \mu_h), \tag{1}$$

где ρ - удельное сопротивление, σ - удельная проводимость, N_a - атомная концентрация, n_e, n_h - число электронов и дырок на атом $|e|$ - заряд электрона. Атомная концентрация или другими словами число атомов в единице объема определялось, используя данные параметров решетки ОЦК исследованных сплавов в области твердого раствора [20]. На объем элементарной ячейки ОЦК решетки приходится два атома, тогда число атомов в одном см³ составляет $N=2/v$, где v - объем элементарной ячейки. В случае чистого молибдена количество электронов и дырок, приходящихся на один атом, равны (см. рис. 9 работы [1], приведенной в данной работе как рис.1).

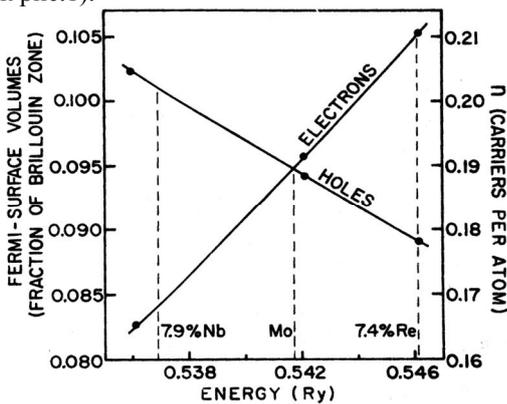


Рис. 1. Зависимость числа электронов и дырок от энергии в соответствии с заполнением дырочных и электронных частей поверхностями Ферми. Пунктирными линиями обозначены Ферми уровни для Mo, Mo-7,3 at%Nb, Mo-7,4 at% Re [1]

Добавление примесей Re смещает уровень Ферми, изменяя количество электронов и дырок n_e и n_h на атом, эти значения для различных концентраций определялось по графику рис.9 работы [1] (см. рис.1).

Формула, связывающая постоянную Холла R и сопротивление в двухзонной модели, имеет следующий вид [1]:

$$\frac{R}{\rho^2} = N_a |e| (n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2). \tag{2}$$

Используя выражения (1) и (2) получаем квадратное уравнение для определения μ_e :

$$\mu_e^2 \left(\frac{n_h^2}{n_h} - n_e \right) - \frac{2n_e \mu_e}{\rho N_a |e| n_h} + \frac{1}{(\rho N_a |e|)^2 n_h} - \frac{R}{\rho^2 N_a |e|} = 0. \tag{3}$$

Подставляя значения удельного сопротивления и коэффициента Холла [1] при различных значениях температур определим температурную зависимость $\mu(T)$.

Решение уравнения (3) дает два значения для электронной подвижности, одно из которых соответствует правильному физическому смыслу. Выбор знака при решении квадратного уравнения определяется знаком постоянной Холла и соотношением между плотностями электронов и дырок. В данном случае, при положительной постоянной Холла и при большей электронной плотности действительно следует выбирать меньший корень (знак минус), поскольку в противоположном случае дырочная подвижность оказывается отрицательной (хотя должна быть положительной в силу определения).

Некоторые значения подвижности можно сравнить с данными, приведенными в работе [1]. Например, подвижность электронов для Mo-Re 7ат% при $T=80\text{K}$ имеет значение $\mu_e = 62\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{сек}^{-1}$, совпадающее с табличными данными работы [1]. Температурные зависимости подвижности электронов для Mo и сплавов Mo-Re приведены на графике рис. 2.

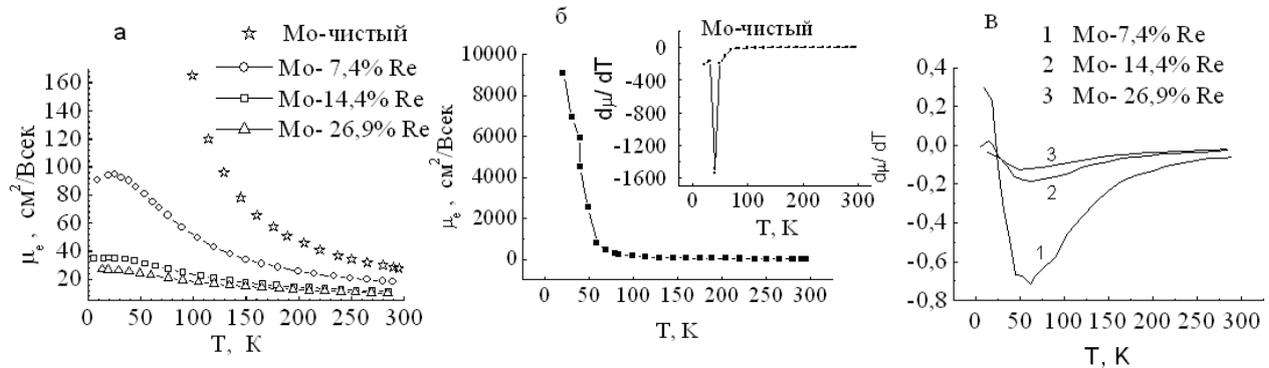


Рис.2. Зависимость подвижности и ее производной по температуре от температуры а) подвижность Mo и сплавов Mo- Re; б) подвижность и производная подвижности по температуре Mo; в) производные подвижности по температуре сплавов Mo- Re.

Из этих результатов видно, что для Mo и сплавов Mo-Re с концентрациями 7ат% Re и 14ат% Re подвижность электронов нелинейно уменьшается с увеличением температуры. Резкое падение подвижности, достигая минимального изменения при 50K, как видно по ходу ее производной по температуре (рис.1б, 1в.), сменяется плавной зависимостью с дальнейшим насыщением при увеличении температуры. Это соответствует минимуму производной $d\mu/dT$, затем рост производной с дальнейшим обращением в нуль выше $\sim 50\text{K}$, как для Mo, так и для сплавов Mo-Re. Для чистого Mo эти зависимости резкие. Добавление примеси размывает особенности, но характерные точки, а именно минимум производной и выход на насыщение выше $\sim 50\text{K}$ остаются.

Зависимость подвижности от концентрации для сплавов Mo-Re при различных фиксированных температурах имеет такой же характер, как и температурная зависимость для сплавов с фиксированной концентрацией. Зависимости μ (Cat%) приведены на рис. 3. по данным [1] в логарифмическом масштабе.

Из этого графика видно, что повышение температуры приводит к размытию концентрационных зависимостей. Сравнивая результаты, приведенные на рис.2 и рис.3 видно, что примесь рения и температура влияют на подвижность электронов идентичным образом. Аналогичные результаты получены по данным работы [2] при исследовании температурной зависимости проводимости, $\sigma(T)$ для Mo и его сплавов с примесью Re.

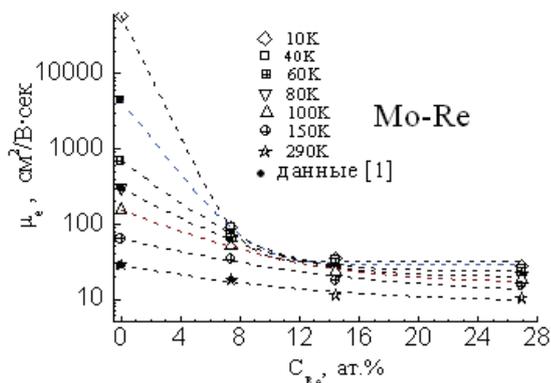


Рис.3. Зависимость подвижности Mo и сплавов Mo- Re от концентрации при различных температурах по данным [1].

получаем параметр затухания $\Gamma=22\text{K}$, а $d\Gamma/dC_{at\%} \sim 3\text{K/at\%}$, тогда для сплава Mo с 10ат% Re параметр Γ составит $\sim 30\text{K}$. Это значение совпадает с результатом $\Gamma=30\text{K}$ для сплава Mo-10ат% Re, определенным в работе [9] по независимым экспериментальным данным термо-ЭДС. Такое соответствие результатов, полученных из разных экспериментов, свидетельствует о корректном определении величины μ_e .

Заметим, что экспоненциальная температурная зависимость проводимости Mo до $\sim 50\text{K}$, наблюдаемая в

Из полученных данных можно оценить значение параметра затухания, исходя из результатов измерения температурной зависимости постоянной Холла и удельного сопротивления [1]. Как пример приведем оценку для сплава Mo-7,4ат.%Re при низких температурах, когда время релаксации определяется рассеянием на примесях. Времена релаксации

определим, исходя из выражения $\tau = \frac{m_e \mu}{e}$, где m_e - масса свободного электрона, e - заряд электрона, μ - подвижность носителей. Тогда параметр затухания Γ определяется выражением $\Gamma = \frac{\hbar}{2\pi k \tau} = \frac{\hbar e}{2\pi k \mu m_e}$ [19], где

k - постоянная Больцмана. Используя значение подвижности электронов μ_e для сплава Mo-7,4ат.% Re

работе [2], находится в соответствии с зависимостью подвижности электронов μ_0 от температуры, полученной в данной работе с использованием независимых экспериментальных данных по эффекту Холла [1], и характерна для проводимости полупроводников. Переход к насыщению в этих зависимостях выше $\sim 50\text{K}$, то есть отсутствие зависимости подвижности от температуры, характерно для металлов. Смена одного механизма проводимости другим можно отнести к переходу металл-диэлектрик, связанному с близостью уровня Ферми к критическим точкам электронного спектра μ_0 .

Следует отметить, что для μ_0 резкое экспоненциальное уменьшение удельной проводимости в указанной области температур [2], происходит только лишь под влиянием температуры как внешнего воздействия, и следовательно связано с изменением динамики движения электронов. Интервал температур до $\sim 50\text{K}$ соответствует изменению энергии $kT = 0,0043\text{ эВ}$. По данным работы [2] этот же интервал энергии можно пройти уровнем Ферми под действием примеси рения до $\sim 3\text{-}4\text{ат}\% \text{ Re}$ в μ_0 , но при низких температурах, и получить аналогичную зависимость удельной проводимости μ_0 от концентрации Re при фиксированной температуре в том же интервале энергетической шкалы. Поэтому авторы данной статьи предполагают, что наблюдаемые особенности проводимости и подвижности электронов в μ_0 могут быть связаны с электронами, заполняющими энергетические состояния у дна зоны, тогда в обоих случаях динамика движения электронов имеет особенности. Это может происходить как результат электронно-топологических переходов при изменении положения уровня Ферми относительно критических энергий электронного спектра либо у дна зоны уже существующей малой группы электронов в металле. В случае электронно-топологических переходов эти особенности соответствуют сопутствующему переходу металл-диэлектрик, или появлению квазидискретного характера электронного спектра (локализации электронов) в узкой области энергий у дна новой зоны до края подвижности на фоне сплошного спектра свободных электронов. Такие электроны имеют тяжелые эффективные массы и приводят к U -процессам рассеяния и активированному (прыжковому) характеру проводимости для этих электронов. В случае μ_0 экспоненциальный ход проводимости и подвижности в интервале температур до $\sim 50\text{K}$ обусловлен близостью уровня Ферми к критической точке ϵ_{k1} – энергии зарождения электронной линзы ниже уровня Ферми (см. $\epsilon(k)$ [5]).

В работе [2] показано, что для проявления таких особенностей не важно под влиянием какого внешнего параметра изменяется ϵ_F , а существенно какой энергетический интервал пройден уровнем Ферми относительно критических точек электронного спектра и в каком направлении. Это означает, что при переходе уровня Ферми через критическую точку электронного спектра или, приближаясь к ней, электроны, заполняющие новую энергетическую зону, «локализованы» в узком интервале энергий до края подвижности и существенным оказывается энергия активации, при которой происходит делокализация электронов, что характерно для переходов металл-диэлектрик. По нашим предположениям для μ_0 край подвижности соответствует $\sim 50\text{K}$.

Аналогичные особенности в проводимости с учетом возможного перехода Пайерлса, когда в проводимости существенными становятся процессы переброса (скачкообразный характер проводимости с участием фононов), рассматривались в работе [21], хотя без ссылок на эксперимент.

Результаты данной работы качественно отражают изменение характера проводимости в случае близости уровня Ферми к критическим точкам электронного спектра, когда механизм переноса заряда оказывается чувствительным к малейшему смещению энергии Ферми. Мы наблюдаем в μ_0 смену одного механизма проводимости характерного для полупроводников другим, присущим для металлов.

Обратим внимание на то, что в μ_0 критическую энергию ϵ_{c1} ниже уровня Ферми, которая соответствует малой электронной линзе, можно рассматривать как зарождение малой полости ПФ, но при меньших энергиях по сравнению с ϵ_{c2} . Тогда свойства этих электронов должны быть аналогичны тем, которые образовали малую полость поверхности Ферми в сплавах $\mu_0\text{-Re}$ с концентрациями рения выше $10\text{ат}\%$ [8,9]. Другими словами, динамика электронов малых групп имеют особенности, связанные с их локализованными состояниями в окрестности особых точек.

Энергия Ферми μ_0 находится в зазоре $\epsilon_C - \epsilon_F$ между двумя критическими энергиями $\epsilon_{c2} > \epsilon_F > \epsilon_{c1}$. Примесь рения повышает уровень Ферми. Концентрация рения $7\text{ат}\%$ в μ_0 соответствует приближению уровня Ферми к критической точке ϵ_{c2} электронного спектра μ_0 , при которой происходит электронно-топологический переход ЭТП [8,9] и росту малой электронной линзы с критической энергией ϵ_{c1} . Тогда, наблюдаемые экстремумы производной подвижности по температуре при $\sim 50\text{K}$, можно сопоставлять с прохождением уровня Ферми через особенность по температуре, соответствующую краю подвижности электронов, локализованных на краю спектра. По отношению к особенности ϵ_{c1} - это делокализация электронов малой электронной линзы, зародившейся при ϵ_{c1} .

Концентрация $14\text{ат}\% \text{ Re}$ в μ_0 соответствует положению уровня Ферми выше критической точки ϵ_{c2} , когда под действием примеси $\sim 10\text{ат}\%$ рения возникла новая электронная группа с локализованными электронами на краю спектра – дно новой зоны в точке ϵ_{c2} . Уровень Ферми для $14\text{ат}\% \text{ Re}$ удаляется от критической точки ϵ_{c2} и локализованные состояния электронов, приближаясь к краю подвижности $\sim 50\text{K}$, делокализуются, минимум производной $d\mu/dT$ размывается в соответствии с увеличением параметра затухания Γ . Изменение

подвижности практически исчезает при содержании примеси рения $\sim 26\text{at}\%$ в Мо, когда критические энергии электронного спектра и край подвижности малых групп пройдены и проводимость приобретает металлический характер. Край подвижности определяется энергией активации, которая, как видно из эксперимента, для Мо соответствует $\sim 50\text{K}$. Таким образом, для Мо и сплавов Мо-Re с концентрациями ниже $10\text{at}\%$ Re, наблюдаемые особенности проводимости и подвижности электронов можно отнести к малой электронной линзе с $\varepsilon_{C1} < \varepsilon_F$ близкой к энергии Ферми.

Дырочные полости поверхности Ферми в соответствии с $\varepsilon(k)$ Мо находятся намного дальше от уровня Ферми по сравнению с электронными: $\varepsilon_{C1} < \varepsilon_F$ дно зоны для электронной линзы и $\varepsilon_{C1} > \varepsilon_F$ - дно незаполненной зоны, поэтому в данной работе уделяется внимание только особенностям электронной подвижности, связанной с малыми электронными полостями поверхности Ферми.

Кроме того, различные методы исследований проводимости или $\rho(T)$ Мо: показали ряд особенностей, которые не укладываются в рамки классического рассмотрения зависимости $\rho(T)$: 1) отсутствует участок зависимости, связанный с рассеяния электронов на статических дефектах; температурной зависимости на начальном участке пропорциональна T^4 [11], что отражает влияние малых участков поверхности Ферми на кинетические характеристики [21]. Для проводимости – это процессы переброса, связанные в Мо с критической энергией ε_{C1} , относящейся к зарождению малой электронной линзы.

Результаты, приведенные в данной работе, показывают, что критические точки электронного спектра являются причиной частичной диэлектризации электронов (их локализации), участвующих в формировании малых участков поверхности Ферми в узком интервале энергий. Под влиянием внешних воздействий (температура, излучение) при достижении края подвижности электроны принимают свойства свободных.

Приведенные результаты позволяют предположить, что условия электронно-топологических переходов одновременно удовлетворяют условиям перехода металл-диэлектрик в направлении $\varepsilon(k)$ относительно границ зоны Бриллюэна, где имеется узкий зазор-щель между уровнем Ферми и этой границей. Можно предположить, что это соответствует частичной диэлектризации электронного спектра, что приводит к особенностям физических характеристик.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что близость энергии Ферми к критическим точкам электронного спектра может привести к изменению энергетического состояния электронов в узком интервале энергий. Изменение положения уровня Ферми относительно этих точек может привести к пересечению уровнем Ферми критической точки электронного спектра, что приводит к двум особенностям: появление новых участков поверхности Ферми и квазидискретному характеру электронного спектра у дна зоны. Это в свою очередь приводит к особенностям кинетических характеристик, связанным с краем подвижности для электронов, локализованных на краю спектра. Край подвижности определяется энергией активации, необходимой для делокализации той части электронов, которая находится в окрестности особых точек электронного спектра и соответствует переходу от одного механизма проводимости к другому.
2. Показано, что такие особенности проявляются в температурных зависимостях подвижности электронов в Мо и сплавах Мо-Re, как минимум в производной подвижности по температуре при $\sim 50\text{K}$. Эти результаты получены по экспериментальным литературным данным эффекта Холла для Мо и сплавов Мо-Re. Минимум в производной подвижности по температуре при 50K соответствует переходу от экспоненциальной зависимости к степенной при этой же температуре с дальнейшим насыщением в температурной зависимости проводимости для таких же образцов, исследованных другими методами.
3. По нашим предположениям наличие малых групп в металлах могут быть причиной наблюдаемых особенностей, которые свидетельствуют о частичной диэлектризации электронного спектра в узком интервале энергий той части электронов, которая заполняет энергетические состояния у дна зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Royal Cox W., Hayes D.J., Brotzen F.R. 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 // Phys. Rev.B.- 1973.- Vol.7, №8.- R.3580-3588.
2. Ignatyeva T.A. Partial dielectric behavior of the Mo electron spectrum as an effect of Van Hove singularities // International Scientific Journal Semiconductor Physics Quantumelectronics and Optoelectronics. - 2011.- Vol.14, №4. - P. 482-489
3. Zaytsev R.O., Kuz'min E.V., Ovchinnikov S.G. Osnovnye predstavleniya o perekhodakh metall-dielektrik v soedineniyakh 3-1 metallov // Uspekhi fizicheskikh nauk. -1986.-Tom 148. -Vyp. 4. -S. 603-633,
4. Katsnel'son M.I., Trefilov A.V. Ob elektronnykh fazovykh perekhodakh, obuslovlennykh korrelyatsionnymi effektami // Pis'ma ZhETF. -1984.-T. 40. - S.303.
5. Iverson R.J., Hodges L. Molybdenum: band structure, Fermi surface and spin orbit interaction // Phys. Rev. B. - 1973.- Vol.8, №4.- R.1429-1432.
6. Lifshits I.M. Ob anomalyakh elektronnykh kharakteristik metalla v oblasti bol'shikh davleniy // ZhETF.- 1960.- T.38, vyp.5.- S.1569-1576.

7. Makarov V.I., Bar'yakhtar V.G. Ob anomal'yakh temperatury sverkhprovodyashchego perekhoda pod davleniem //ZhETF.- 1965.- T.48, vyp.6.- S.1717-1722.
8. Ignat'eva T.A., Gann V.V., Velikodnyy A.N. Issledovanie elektronno-topologicheskogo perekhoda v sverkhprovodyashchikh splavakh Mo-Re, Mo-Re-Nb //FNT. -1994.- T.20 (11). – C.1133-1141.
9. Ignat'eva T.A., Velikodnyy A.N. Osobennosti termoeds splavov Mo-Re, Mo-Re-Nb i elektronno-topologicheskii perekhod v etikh sistemakh // FNT.-2002. - T.28, №6.- S.569- 579.
10. Ignat'eva T.A., Velikodnyy A.N., San'kov A.A. O temperaturnoy zavisimosti udel'nogo soprotivleniya v splavakh Mo-Re, Mo-Re-Nb // VANT. Seriya: «Vakuum, chistye materialy, sverkhprovodniki» -2004. -Vyp.(14), №6. -C.89-92.
11. Ignat'eva T.A. Osobennosti elektronnoogo spektra i temperaturnaya zavisimost' udel'nogo soprotivleniya mplybdena. // Visnik Kharkivs'kogo universitetu. Seriya fizichna: «Yadra, chastinki, polya». – 2007. - № 763. - Vip. 1/33. - R. 81-87.
12. Ignat'eva T.A., Velikodnyy A.N. Osobennosti elektronnoogo spektra splavov s elektronno-topologicheskim perekhodom i ikh vliyanie na fizicheskie svoystva // Izvestiya RAN seriya fizicheskaya. - 2007. – T.71(8). - S. 1104-1107.
13. Ignat'eva T.A. Vliyanie osobennostey Van-Khova na temperaturnuyu zavisimost' udel'nogo soprotivleniya Mo // Metallofizika i noveyshie tekhnologii. - 2009.-T.31, №2. – S.277-286.
14. Ignat'eva T.A O lokalizatsii elektronov pri elektronno-topologicheskom perekhode v splavakh Mo-Re // Fizika tverdogo tela. – 2007.- T.49. – Vyp.3. -C.389-397.
15. Mott N.F. Perekhody metall-izolyator. - M.: Nauka, 1979. - 342 s.
16. Van Hove L. The occurrence of singularities in the elastic frequency distribution of a crystal // Phys. Rev.- 1953.- Vol.89, №6.- R.1189-1193.
17. Smith T.F., Shelton R.N. Pressure dependence of Tc for the transition metals: bcc solid solution alloys in the system Zr-Nb-Mo-Re // J. Phys. F: Metal Phys. - 1975. - Vol.5, №5. - R.911-922.
18. Velikodnyy A.N. O svyazi efekta razuprochneniya s osobennostyami elektronnoogo spektra v splavakh Mo-Re //Voprosy Atomnoy nauki i tekhniki. - Seriya: Vakuum, chistye materialy, sverkhprovodniki (18). - 2009. -№6. -S. 189-193.
19. Blatt F. Fizika elektronnoy provodimosti v tverdykh telakh. - M.: Mir, 1971. - 470 s.
20. Ageev N.V., Shekhtman V.Sh. Rentgenograficheskoe issledovanie splavov reniya s molibdenom // Izvestiya AN SSSR. Seriya fizicheskaya. - 1959. - T.23, - №5. - S.650-651.
21. Gurzhi, R.N., Kopeliovich A.I. Nizkotemperaturnaya elektroprovodnost' chistykh metallov // UFN.-1981.-T.133.-Vyp 1, S.33-74.