

Особенности тепловых и упругих свойств поликристаллического титана в области электронно-топологического перехода

А. И. Коробов, Н. И. Одина, А. Н. Экономов, А. Н. Бадулина, Т. В. Агеева

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова 119998 Москва, Россия

Поступила в редакцию 14 июня 2006 г.

Приводятся результаты измерений температурных зависимостей амплитуды фотоакустического сигнала и относительного изменения скорости продольного ультразвука в поликристаллическом титане. Обнаружено аномальное поведение этих величин в области температур, соответствующих электронно-топологическому переходу в монокристалле титана. Полученные результаты интерпретируются как экспериментальное подтверждение возможности “выживания” аномалий, связанных с электронно-топологическим переходом, в поликристаллическом металле.

PACS: 71.20.-b

Под электронно-топологическим переходом (ЭТП) понимается качественное изменение топологии поверхности Ферми металлов путем легирования или внешних воздействий [1]. При плавном изменении одного из параметров (температуры, давления или концентрации примесей) энергия Ферми проходит через особенность в плотности электронных состояний, что вызывает аномальное поведение ряда физических величин, в частности таких, как скорость звука и тепловое расширение [2, 3].

Известно большое число работ, посвященных исследованию электронно-топологического перехода в монокристаллах – как чистых металлов (в том числе титана [3]), так и сплавов (висмут – сурьма [2], магний – литий [4]; другие сплавы можно найти в обзоре [5]). Введение примесей приводит к размытию поверхности Ферми. Если аномалии, связанные с электронно-топологическим переходом, превышают величину этого размытия, то электронно-топологический переход может наблюдаться и в сплавах [6]. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что во многих сплавах с близкими свойствами (в том числе в сплаве титан – висмут [8]) концентрационное размытие достаточно мало и можно наблюдать аномалии, связанные с ЭТП [6–8].

Нам известна только одна работа, посвященная вопросу о том, “выживают” ли связанные с ЭТП аномалии наблюдаемых параметров в поликристаллических металлах [9]. В ней теоретически был рассчитан поверхностный импеданс в условиях аномального скин-эффекта для поликристаллов, состоящих из кристаллитов с различными модельными типами поверхностей Ферми и различными типами ЭТП. В рамках выбранных теоретических моделей было показано, что эффективный поверхностный им-

педанс поликристаллических металлов действительно выявляет особенности в окрестности электронно-топологического перехода. При этом было найдено, что в том случае, если для монокристалла в окрестностях критической точки импеданс не очень чувствителен к ориентации кристаллографических осей, в поликристалле особенность будет того же типа, если же зависимость сильная, то характер особенности может изменяться.

Об экспериментальном наблюдении ЭТП в поликристаллических металлах нам не известно. Поэтому представляют интерес экспериментальные исследования, связанные с выявлением аномалий термодинамических параметров и кинетических коэффициентов в поликристаллах металлов, ранее проявлявших ЭТП для монокристаллов. Одним из таких металлов является титан [3, 8].

Образец поликристаллического титана, исследованный в настоящей работе, был выращен методом йодного транспорта. Кристаллическая структура образца определялась на порошковом дифрактометре ДРОН-4 (Cu- K_α -излучение, $\lambda = 1.54178 \text{ \AA}$). Параметры гексагональной решетки образца ($a = 2.957(4) \text{ \AA}$, $c = 4.686(4) \text{ \AA}$, $c/a = 1.584$) хорошо соответствуют известным данным для α -титана ($a = 2.959 \text{ \AA}$, $c = 4.689 \text{ \AA}$, $c/a = 1.584$) [10]. Исследуемый образец титана обладал текстурой (около 80%) по плоскости (0001). Образцы в форме цилиндров (диаметром 10 мм и высотой 14 мм для акустических и 2 мм для фотоакустических измерений) были вырезаны таким образом, что гексагональная ось c текстуры была ориентирована перпендикулярно основаниям цилиндра, к которым подклеивались преобразователи. В качестве контрольного образца использовалась фольга из поликристаллической меди (99.9%).

Измерения осуществлялись двумя методами – акустическим и фотоакустическим (ФА) – для того, чтобы исследовать поведение двух термодинамических параметров: упругих модулей второго порядка и коэффициента теплового расширения. Фотоакустический эффект заключается в генерации акустических волн в твердом теле при поглощении им модулированного излучения. При этом термоупругое смещение поверхности, регистрируемое пьезоэлектрическим датчиком как напряжение между его электродами V и называемое ФА сигналом, определяется следующим выражением [11]:

$$V \propto \frac{P}{fd} \cdot \frac{\alpha(1+\nu)}{\rho c_p}, \quad (1)$$

где P – поглощенная образцом оптическая мощность, α – коэффициент теплового расширения образца, ν – коэффициент Пуассона, c_p – теплоемкость при постоянном давлении, ρ – плотность, d – толщина образца, f – частота модуляции интенсивности излучения. Из анализа этого выражения видно, что величина фотоакустического сигнала определяется как тепловыми, так и акустическими параметрами образца. Измерение температурной зависимости ФА сигнала позволяет исследовать поведение тепловых и акустических параметров образца в области фазовых переходов.

Экспериментальная установка для фотоакустических измерений [12] позволяла измерять как продольную, так и поперечную компоненты термоупругого смещения. В работе измерялась поперечная компонента смещения с освещенной стороны образца при непрерывном гармоническом возбуждении. Скорость изменения температуры составляла менее 1° в минуту. Измерения велись при нагревании.

Результаты экспериментального исследования поликристаллического титана фотоакустическим методом представлены на рис.1. Видно, что на температурной зависимости амплитуды ФА сигнала для титана в области температур 150–160 К присутствует аномалия в виде ступеньки, которая не наблюдается для контрольного образца. Анализ температурного поведения величин, входящих в (1), показывает, что теплоемкость титана в этом температурном интервале особенностей не имеет [13]. Изменением толщины образца и плотности также можно пренебречь. Особенно значительно изменяется коэффициент теплового расширения [3]: температурная зависимость продольной и поперечной компонент различна, причем продольная компонента меняет знак. Для сравнения на рис.2 приведены зависимости эффективного коэффициента теплового расширения α_{eff} титана, рассчитанного по поперечной, α_a , и продольной, α_c , компо-

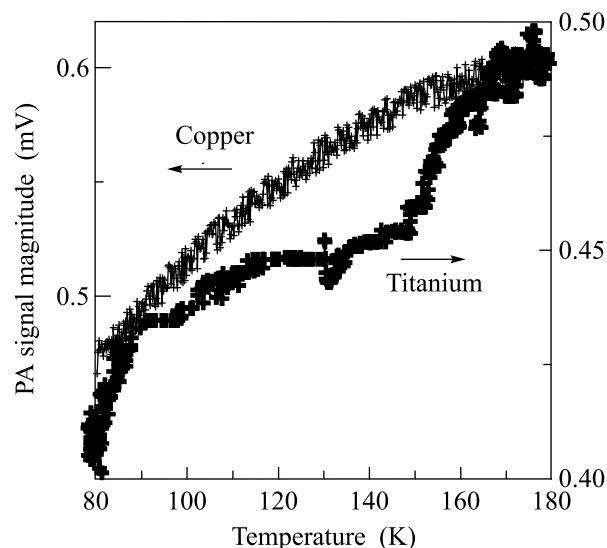


Рис.1. Экспериментально измеренная температурная зависимость амплитуды ФА сигнала для поликристаллического титана и меди (размер символов соответствует величине погрешности измерений)

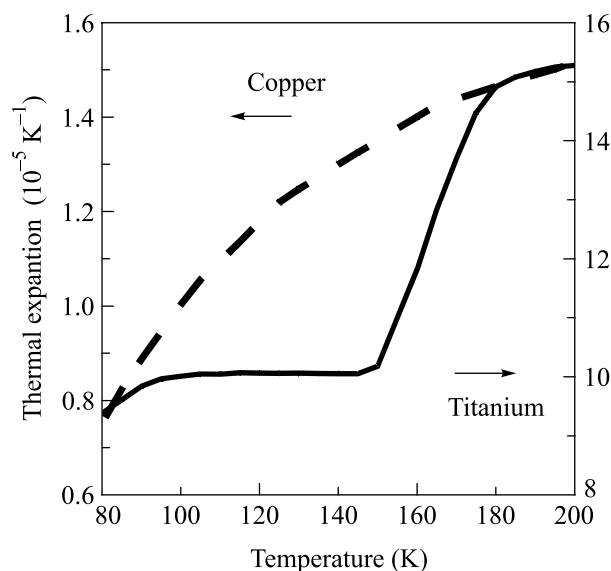


Рис.2. Температурная зависимость коэффициентов теплового расширения для титана и меди (по данным [3] и [15])

нентам тензора теплового расширения [3] в предположении хаотического распределения кристаллитов по формуле [14]

$$\alpha_{\text{eff}} = \frac{2\alpha_a + \alpha_c}{3},$$

а также линейного коэффициента теплового расширения меди по данным [15]. Видно хорошее соответствие между зависимостью амплитуды ФА сигнала от температуры и температурным ходом коэффици-

ента теплового расширения [3, 15]. Ступенька на экспериментальной кривой выражена менее ярко, чем на расчетной: скачок составляет порядка 7%, а при вычислении в предположении хаотического распределения – порядка 45%. Это согласуется с результатами рентгеноструктурного анализа: в настоящем эксперименте измерялась поперечная составляющая термоупругого смещения, а у значительной доли кристаллитов трансверсально была ориентирована ось a , вдоль которой аномалия в тепловом расширении отсутствует. Оценить вклад в амплитуду ФА сигнала упругих модулей можно по результатам акустических измерений.

В образце поликристаллического титана, вырезанном из того же слитка, что и для фотоакустических исследований, стандартным эхо-импульсным методом [16] были проведены измерения температурной зависимости скорости продольного ультразвука частотой 5 МГц, результаты которого представлены на рис.3. Видно, что для титана при температу-

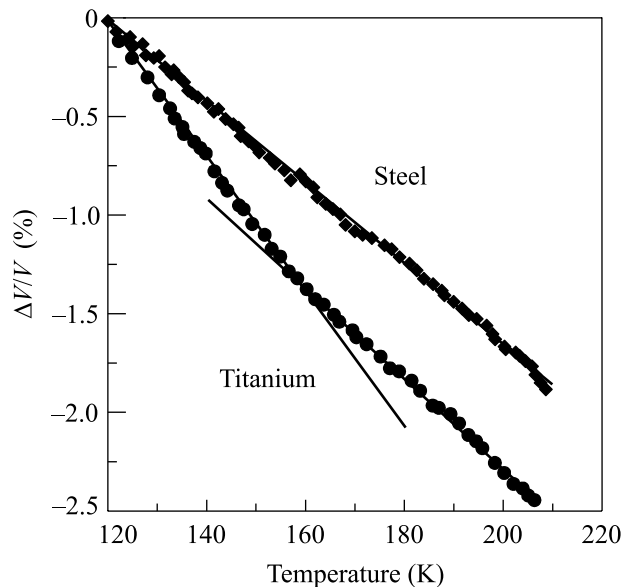


Рис.3. Экспериментально измеренная температурная зависимость относительного изменения скорости продольного ультразвука для поликристаллического титана и стали (символами обозначены экспериментальные значения, сплошными линиями – аппроксимирующие прямые)

ре $T \sim 160$ К происходит изменение наклона прямой температурной зависимости относительного изменения скорости акустических волн $\Delta V/V_0(T)$ (на контрольном образце, выполненном из стали, такая аномалия отсутствует). Из акустических измерений можно сделать два вывода. Во-первых, при $T \sim 160$ К

в поликристаллическом титане нами выявлена особенность в упругих свойствах. Во-вторых (применительно к анализу фотоакустических данных), эта особенность дает малый вклад в ФА сигнал, и его температурная зависимость в основном определяется тепловым расширением.

Таким образом, проведенные исследования дают основания полагать, что наблюдавшиеся в образце поликристаллического титана при $T \sim 160$ К аномалии температурной зависимости амплитуды фотоакустического сигнала и скорости акустических волн объясняются близостью к электронно-топологическому переходу.

Работа была выполнена в Центре коллективного пользования физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова по нелинейной акустической диагностике и неразрушающему контролю при поддержке гранта Президента Российской Федерации # НШ-4449.2006.2 и грантов Российского фонда фундаментальных исследований # 05-02-16327-а и # 06-02-16658-а.

1. И. М. Лифшиц, ЖЭТФ **38**, 1569 (1960).
2. С. Г. Буга, Б. Б. Воронов, Л. К. Зарембо, А. И. Коробов, ФТТ **27**, 2291 (1985).
3. В. И. Нижанковский, М. И. Кацнельсон, Г. В. Песчанских, А. В. Трефилов, Письма в ЖЭТФ **59**, 693 (1994).
4. В. Г. Вакс, А. В. Трефилов, С. В. Фомичев, ЖЭТФ **80**, 613 (1981).
5. Ya. M. Blanter, M. I. Kaganov, A. V. Pantsulaya, and A. A. Varlamov, Phys. Rep. **245**, 159 (1994).
6. Г. Эренрейх, Л. Шварц, *Электронная структура сплавов*, М.: Мир, 1979 (H. Erenreich and L. M. Schwartz, *The electronic structure of alloys*, Academic, New York, 1976).
7. B. N. Powell, P. Martell, and A. D. V. Woods, Phys. Rev. **171**, 727 (1968).
8. Н. В. Башкатов, Н. Л. Сорокин, ФТТ **31**, 326 (1989).
9. I. M. Kaganova and M. I. Kaganov, Phys. Rev. B **63**, 54202-1 (2001).
10. А. И. Миркин, *Справочник по рентгеноструктурному анализу кристаллов*, под ред. Я. С. Уманского, М.: Физматгиз, 1961.
11. W. Jackson and N. M. Amer, J. Appl. Phys. **51**, 3343 (1980).
12. А. И. Коробов, Н. И. Одина, А. Н. Бадулина, в тр. XVI сессии РАО, Москва **1**, 157 (2005).
13. P. D. Desai, Int. J. Thermophys. **8**, 781 (1987).
14. С. И. Новикова, *Тепловое расширение твердых тел*, М.: Наука, 1974.
15. T. A. Hahn, J. Appl. Phys. **41**, 5096 (1970).
16. А. И. Коробов, ПТЭ № 3, 212 (1995).