

УДК 539.63

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В УДАРНО-СЖИМАЕМОМ ИТТЕРБИИ

С. Д. Гилёв

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, gilev@hydro.nsc.ru

С целью исследования фазовых превращений иттербия при ударном сжатии выполнены измерения электросопротивления иттербия при начальных температурах 77 и 290 К и ударном давлении $p \leq 20$ ГПа. Зависимость электросопротивления иттербия от давления носит немонотонный характер и свидетельствует о трех последовательных фазовых переходах. При $p \approx 2$ ГПа иттербий переходит в состояние с большим электросопротивлением, которое имеет полупроводниковый характер. Оценка ширины запрещенной зоны иттербия при $p \approx 1.8$ ГПа приводит к значению ≈ 0.02 эВ. При $p \approx 3$ ГПа электросопротивление иттербия уменьшается, что обусловлено полиморфным фазовым переходом. При дальнейшем повышении давления электросопротивление сначала растет, а при $p > 11$ ГПа практически не меняется. Для определения природы третьего перехода выполнены расчеты температуры образца при ударном сжатии. Анализ зависимости температуры образца от ударного давления вместе с фазовой диаграммой иттербия позволяет сделать вывод, что третий переход обусловлен плавлением иттербия.

Ключевые слова: иттербий, ударное сжатие, электросопротивление, фазовые переходы, плавление.

ВВЕДЕНИЕ

Физические свойства иттербия в области высоких давлений являются предметом исследований начиная с классических работ Бриджмена [1]. Интерес к иттербию обусловлен его сложным поведением при сжатии и, в частности, своеобразным фазовым переходом из металлического в полупроводящее состояние. Такой переход нехарактерен для физики высоких давлений, хотя и наблюдается еще для нескольких металлов.

Фазовые превращения в иттербии наиболее полно исследованы в условиях статического сжатия [1–10]. Использовались методы электросопротивления [1–4, 6, 7], рентгеновской дифракции [8, 10], термоЭДС [5], измерения скорости упругих волн [9]. В настоящее время в исследованиях достигнут уровень статического давления до $p \approx 202$ ГПа [10]. Последовательность кристаллических фаз иттербия при повышении давления выглядит следующим образом: ГЦК(I) — ОЦК — ГПУ — ГЦК(II) — гексогональная структура $hP3$. Давления структурных переходов при комнатной температуре составляют 4, 26, 53 и 98 ГПа соответственно. Переход металл — полупроводник начинается при $p \approx 1.3$ ГПа [2, 3, 5, 9] и не сопровождается изменением кристаллической структуры. Обычно этот переход объясняют появле-

нием энергетической щели между заполненными энергетическими зонами при сжатии (например, между зонами $6s$ и $6p$). Максимум электросопротивления регистрируется при $p \approx 3$ ГПа. При дальнейшем повышении давления электросопротивление уменьшается и иттербий снова становится металлом.

Фазовые превращения в иттербии при ударном сжатии исследованы в меньшей степени, чем при статическом сжатии [11–19]. Использовались методы определения сжимаемости [11–13] и электросопротивления [14–19]. На зависимости волновой скорости от массовой обнаружен излом ($p \approx 15$ ГПа [12], $p \approx 16$ ГПа [13]), который связывают с плавлением или перестройкой электронной структуры. Зависимости электросопротивления от ударного давления [14, 18] имеют немонотонный характер, что отражает происходящие фазовые переходы. Интерес к иттербию вызван, в частности, большим коэффициентом пьезосопротивления, что позволяет использовать его в качестве чувствительного элемента датчиков малого ударного давления [16, 19].

Поведение иттербия при ударном сжатии отличается большей сложностью, чем при статическом сжатии, что обусловлено ударным нагревом и кратковременностью ударного воздействия. Обычно при электрических измерениях фольга иттербия размещается между толстыми слоями диэлектрика, имеющи-

ми меньшую динамическую жесткость. В этом случае термодинамическое состояние образца устанавливается в ходе циркуляции волн сжатия и разрежения. В результате реверберации волн фольга испытывает дополнительный тепловой нагрев, зависящий от соотношения ударных сжимаемостей иттербия и диэлектрика. При использовании различных диэлектриков коэффициент увеличения электросопротивления иттербия получается разным при одинаковом давлении в диэлектрике. Это приводит к трудностям интерпретации результатов измерения электросопротивления.

Имеющиеся на сегодняшний день экспериментальные данные по электросопротивлению [14–19] не связаны с термодинамическим состоянием иттербия, что затрудняет сопоставление результатов и не позволяет прийти к однозначным выводам о давлении фазовых переходов и их природе.

Ряд полученных экспериментальных результатов не нашел разумного объяснения. Так, в [14] в диапазоне $p \approx 8 \div 15$ ГПа отмечен большой рост электросопротивления, чем при $p \approx 2 \div 3$ ГПа (где ожидается переход металл — полупроводник). Природа предполагаемого фазового превращения при $p \approx 8 \div 15$ ГПа не выяснена, однако считается, что он не связан с плавлением, а является электронным переходом [14]. Отметим, что в данном диапазоне давления при статическом сжатии не обнаружено каких-либо фазовых переходов.

Для определения природы фазовых превращений иттербия можно варьировать начальную температуру образца. Такой способ исследования особенно эффективен для перехода металл — полупроводник. Действительно, зависимости электросопротивления от температуры для металла и полупроводника качественно различны. Информация о термодинамических параметрах ударно-сжатого образца также необходима для корректного анализа результатов измерения в опытах с тонкими фольгами.

Интерес к поведению иттербия при ударном сжатии связан также с идеей использования ударно-индуцированных фазовых переходов для задач импульсной энергетики [20]. Можно попытаться использовать фазовый переход металл — полупроводник (и соответствующий рост электросопротивления образца при ударном сжатии) для создания быстродействующего токового ключа. Такой способ

коммутации может стать перспективным, если удастся достичь роста электросопротивления в $\approx 10^2$ раз.

При статическом сжатии иттербия зарегистрирован рост электросопротивления до 10^4 раз [3]. В условиях ударного сжатия температура образца растет, поэтому коэффициент увеличения сопротивления должен быть меньше. В экспериментах [14–18] зарегистрирован рост электросопротивления в несколько раз. Можно надеяться, что понижение начальной температуры образца приведет к росту коэффициента увеличения сопротивления.

Цель настоящей работы заключалась в определении природы фазовых превращений в иттербии при ударном сжатии. В частности, мы интересовались предполагаемым фазовым переходом в диапазоне давления $8 \div 15$ ГПа. Сопутствующей задачей исследования являлось определение максимального изменения сопротивления иттербия в связи с возможными положениями перехода металл — полупроводник в задачах импульсной электрофизики.

В отличие от известных работ [14–19], измерение электросопротивления проводилось при двух начальных температурах (77 и 290 К) и разных режимах нагружения, что позволило варьировать термодинамические параметры ударно-сжатого образца. Кроме того, для анализа физического состояния ударно-сжатого образца получены термодинамические оценки, что вместе с фазовой диаграммой иттербия дало возможность судить о природе фазовых превращений. Значительная часть экспериментов по измерению электросопротивления выполнена в 1980-х годах и кратко представлена в обзоре по ударно-индуцированным волнам проводимости [20]. В настоящей работе данные ранних измерений уточнены и дополнены новыми результатами, полученными при однократном и многократном ударном сжатии иттербия.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Слиток иттербия (марка ИтбМ-1, ТУ 48-4-204-72) прокатывался в фольгу. Образцы имели следующие характерные размеры: толщина ≈ 50 мкм, длина 20 мм, ширина $5 \div 8$ мм. Удельное электрическое сопротивление образца составляло около $3.1 \cdot 10^{-5}$ Ом·см. Образец иттербия вместе с токоподводами из никелевой фольги располагался между

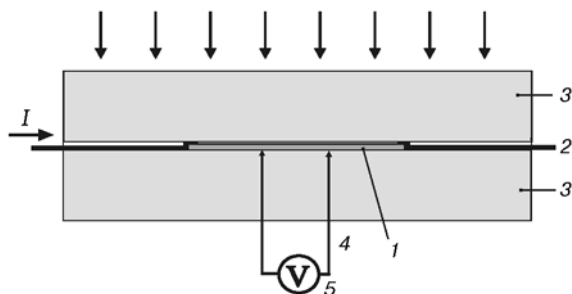


Рис. 1. Схема измерения электросопротивления иттербия:

1 — фольга иттербия, 2 — токоподводы из никелевой фольги, 3 — пластины из гетинакса, 4 — электроды, 5 — осциллограф; для удобства восприятия элементы схемы показаны не в масштабе

пластинами из гетинакса (рис. 1). Электроды (тонкие стальные иглы, расстояние между ними 6 мм) подсоединялись к центру образца и располагались перпендикулярно его плоскости со стороны, противоположной заряду взрывчатого вещества (ВВ). Пустоты в измерительной ячейке заполнялись эпоксидным клеем. Вследствие сильного различия толщин, установившееся давление в образце отождествлялось с давлением в гетинаксе.

Плоская ударная волна создавалась генератором плоской волны с основным зарядом литого ВВ (диаметр $70 \div 75$ мм), который находился сверху на измерительной ячейке. Для ослабления ударной волны в большей части экспериментов между зарядом ВВ и образцом располагались слои материалов с резко различающимися ударными импедансами (медь — гетинакс и т. п.). Такая слоистая система генерировала в диэлектрике систему ударных волн увеличивающейся амплитуды. В нескольких опытах между основным зарядом ВВ и измерительной ячейкой располагался воздушный зазор. В этом случае в диэлектрике возникала волна сжатия, имеющая столбовидный профиль давления.

На стадии планирования экспериментов давление ударной волны оценивалось на основе известных ударных адиабат материалов [21] методом ударных импедансов. Контроль давления в диэлектрике осуществлялся при помощи манганинового датчика давления, который вместо образца размещался между слоями диэлектрика в отдельных экспериментах. Полученные записи давления и электросопротивления иттербия сравнивались с результа-

тами одномерного расчета гидродинамических параметров в месте расположения образца при помощи компьютерной программы «Мастер» (версия 3).

Измерение электросопротивления иттербия проводилось в режиме постоянного тока по четырехточечной схеме [21]. Таким образом, регистрируемое напряжение оказывалось пропорционально электросопротивлению образца. Сила тока, создаваемая при разряде конденсатора на индуктивно-омическую нагрузку, составляла $20 \div 600$ А. Время роста тока около 60 мкс.

Ряд экспериментальных осциллограмм представлен на рис. 2. На всех записях регистрируемое напряжение возрастает при сжатии образца в ударной волне. Время нарастания напряжения в большей части записей составляло $25 \div 100$ нс. Большое время роста соответствовало в среднем опытам при большем ударном давлении. Согласно оценке время прохождения ударной волны по образцу находится в диапазоне $\approx 20 \div 30$ нс (при разных ударных давлениях).

На рис. 2,а показана запись давления, полученная для слоистой системы медь — гетинакс — медь — гетинакс при помощи манганинового датчика. Видно несколько скачков давления, соответствующих последовательности ударных волн в системе. Запись напряжения в опыте по измерению электросопротивления в такой системе представлена на рис. 2,б. Выделяется несколько скачков напряжения, соответствующих изменению сопротивления образца. Таким образом, можно найти сопротивление иттербия при сжатии в первой и второй ударных волнах.

На рис. 2,в приведена осциллограмма, соответствующая давлению первой ударной волны $p_1 = 2.2$ ГПа. Под действием сжатия сопротивление образца увеличивается. Сжатие во второй ударной волне (имеющей большее давление) переводит образец в состояние с малым сопротивлением. Обратный переход происходит через некоторое промежуточное состояние: сопротивление образца в течение 120 нс растет, достигая значения $6.1R_0$, а затем за 50 нс уменьшается до $2.1R_0$. Промежуточное состояние с высоким сопротивлением реализуется при ступенчатом сжатии, если давление первой ударной волны не превышает 2.5 ГПа.

На рис. 2,г,д показаны осциллограммы, полученные при охлаждении образца до темпера-

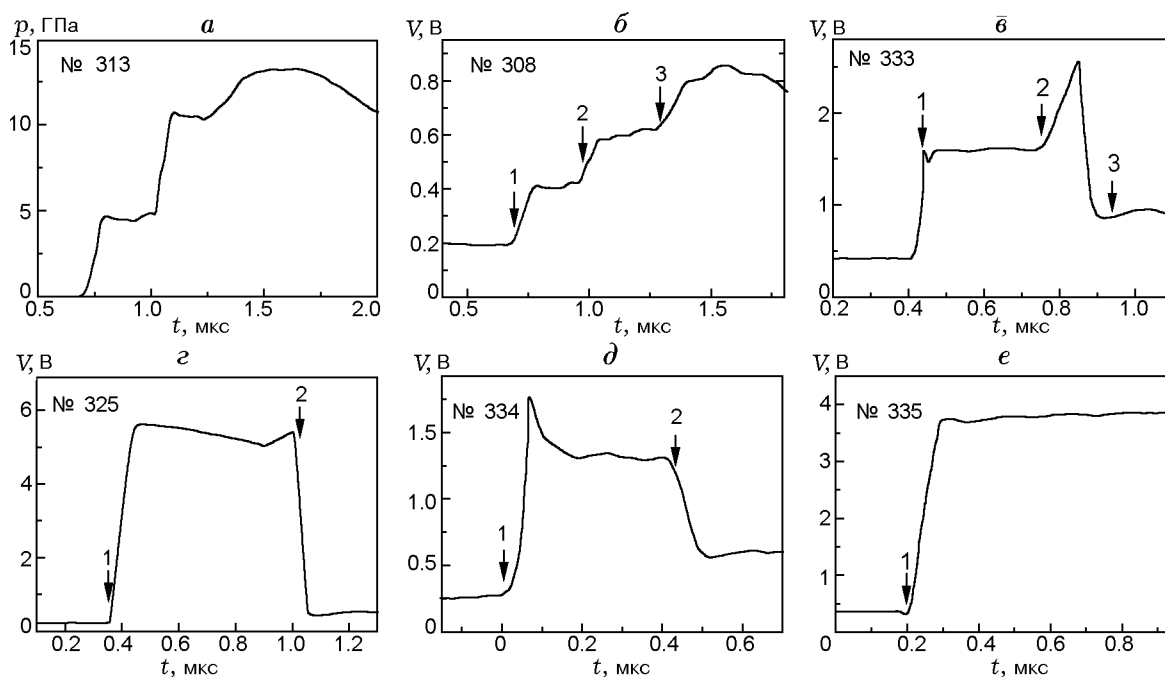


Рис. 2. Записи, полученные в опытах по измерению электросопротивления иттербия:

a — опыт № 313, $p_1 = 4.2$ ГПа, $p_2 = 9.9$ ГПа, $p_3 = 12.3$ ГПа; *б* — опыт № 308, $p = 4.1$ ГПа, $R_1/R_0 = 2.1$, $R_2/R_0 = 3$, $R_3/R_0 = 4$; *в* — опыт № 333, $p_1 = 2.2$ ГПа, $R_1/R_0 = 3.8$, $p_2 = 5.3$ ГПа, $R_2/R_0 = 2.1$; *г* — опыт № 325, $p_1 = 1.8$ ГПа, $R_1/R_0 = 25 \pm 2$, $T_0 = 77$ К; *д* — опыт № 334, $p_1 = 2.6$ ГПа, $R_1/R_0 = 6.8 \rightarrow 5.1$, $T_0 = 77$ К; *е* — опыт № 335, $p_1 = 14.8$ ГПа, $R_1/R_0 = 10.5$; стрелками отмечены моменты прихода первой, второй и третьей ударных волн на образец

туры жидкого азота в слоистой системе. При сжатии в первой ударной волне сопротивление образца сильно растет. При сжатии во второй ударной волне образец переходит в состояние с малым сопротивлением. При этом на записи на рис. 2, *д* состояние сжатого образца устанавливается через промежуточную фазу с более высоким сопротивлением. Сжатие образца в первой ударной волне сопровождается циркуляцией волн, первая из которых имеет максимальное давление (большее, чем давление падающей волны в диэлектрике) и инициирует возникновение промежуточной фазы.

Запись на рис. 2, *е* соответствует большому ударному давлению ($p_1 = 14.8$ ГПа). В этом случае регистрируемое напряжение монотонно растет, выходя практически на постоянный уровень.

В таблице представлена информация о проведенных опытах: тип взрывчатого вещества, материал слоев и их толщина, давление первой и второй ударных волн в диэлектрике, окружающем образец (p_1 и p_2 соответственно). Здесь же приведены полученные значения относительного электросопротивления иттербия

в первой и второй ударных волнах (R_1/R_0 и R_2/R_0 соответственно). Характерная погрешность измерения относительного сопротивления и давления составляла $5 \div 7$ %. Основной массив экспериментов выполнен при температуре ≈ 290 К, четыре эксперимента — при температуре жидкого азота. В последнем случае измерительная ячейка помещалась в кювету с жидким азотом, где охлаждалась около 40 мин.

На рис. 3 полученные экспериментальные данные представлены в виде зависимостей относительного электросопротивления иттербия от давления при сжатии в первой и второй ударных волнах. Здесь же приведены известные данные [14] (образец размещался в легкосжимаемых материалах — парафине, полиэтилене, плексигласе) и [15] (образец в оргстекле, максимальное давление 2.46 ГПа), полученные при ударном сжатии, и данные [18] при квази-изоэнтропическом сжатии (образец в стекле).

ОБСУЖДЕНИЕ

Сначала обратимся к анализу зависимости относительного электросопротивления ит-

Постановка экспериментов и электросопротивление иттербия при ударном сжатии

№ п/п	Слоистая система: материал (толщина, мм)	p_1 , ГПа	R_1/R_0	p_2 , ГПа	R_2/R_0
327	ТГ(60)-г(3.5)-Yb-г(8)	20.2	10.9 ± 1.4	—	—
1093	ТГ(60)-г(3)-Yb-г(5)	20.2	10.5	—	—
335	Т(60)-г(3.5)-Yb-г(8)	14.8	11.4	—	—
1094	Т(60)-Д(5.8)-г(3)-Yb-г(10)	12.3	10.3	—	—
272	ТГ(105)-Cu(2.3)-г(5)-Yb-г(8)	10.5	11.4	15	11
319*	ТГ(70)-Cu(3)-г(3)-Yb-г(8)	10.5	15	14	18
315	ТГ(70)-Cu(3.5)-г(3.5)-Yb-г(8)	10	9.7 ± 1	13	10
317	ТГ(70)-Cu(3.5)-орг(3.5)-г(3.5)-орг(3.5)-г(3.5)-Yb-г(8)	9.2	8.6 ± 0.4	—	—
316	ТГ(70)-Cu(3.5)-орг(3.5)-г(3.5)-Yb-г(8)	9.1	5.5 ± 0.2	13	7.6 ± 0.4
331	Т(70)-Cu(3.5)-г(3.5)-Yb-г(8)	7.5	3	11	4.6
321	ТГ(70)-Cu(3)-фг(3)-Cu(3)-г(3)-Yb-г(8)	6.3	3.8	11.5	4.3
322	ТГ(70)-Cu(3)-фг(3)-Cu(3)-г(3)-Yb-г(8)	6.3	3.1	11.5	4.7
307	ТГ(70)-Cu(3.5)-ст(3.5)-Cu(3.5)-г(3.5)-Yb-г(8)	4.7	2.1	11	2.9
282	ТГ(70)-Cu(4)-г(5)-Cu(4)-г(5)-Yb-г(8)	4.1	2.0	9.1	2.7
308	ТГ(70)-Cu(3.5)-г(3.5)-Cu(3.5)-г(3.5)-Yb-г(8)	4.1	2.1	7.8	3
309	ТГ(70)-Cu(3.5)-орг(3.5)-Cu(3.5)-г(3.5)-Yb-г(8)	3.2	1.6	9.2	2.4
1096	Т(270)- Cu(3)-г(3)-Yb-г(10)	3	1.9	5	1.8
330	Т(70)-Cu(3.5)-г(3.5)-Cu(3.5)-г(3.5)-Yb-г(8)	2.6	1.8	5.5	2.1
334*	Т(70)-Cu(3)-г(3)-Cu(3)-г(3)-Yb-г(8)	2.6	$6.8 \rightarrow 5.1$	5.5	2.2
329	Т(70)-Cu(3.5)-орг(3.5)-Cu(3.5)-г(3.5)-Yb-г(8)	2.5	2.4	5.4	$2.8 \rightarrow 2.4$
1095	гекс(270)-Cu(3)-г(3)-Cu(3)-г(3)-Yb-г(10)	2.5	2.8	6	1.6
318	ТГ(70)-Cu(7)-ст(7)-Cu(3.5)-ст(3.5)-Cu(3.5)-г(3.5)-Yb-г(8)	2.4	3.4	9.7	$4.1 \rightarrow 1.7$
333	ТГ(70)-Cu(6)-г(6)-Cu(3)-фг(3)-Cu(3)-г(3)-Yb-г(8)	2.2	3.8	5.3	$6.1 \rightarrow 2.1$
325*	ТГ(70)-Cu(6)-г(6)-Cu(3)-г(3)-Cu(3)-г(3)-Yb-г(8)	1.8	25 ± 2	6.3	2.8 ± 0.4
323	ТГ(70)-Cu(7)-г(5)-Cu(3.5)-г(3.5)-Cu(3.5)-г(3.5)-Yb-г(8)	1.8	3.25	6.5	$5.1 \rightarrow 1.5$
324	ТГ(70)-Cu(7)-орг(7)-Cu(3.5)-г(3.5)-Cu(3.5)-г(3.5)-Yb-г(8)	1.5	2.4	6	2
326*	ТГ(70)-Cu(7)-орг(7)-Cu(3.5)-г(3.5)-Cu(3.5)-г(3.5)-Yb-г(8)	1.5	20 ± 1.4	6	2.1
225	ТГ(105)-в(10)-г(8)-Yb-г(5)	16	11 ± 1.3	—	—
169	ТГ(15)-в(10)-г(6)-Yb-г(16.8)	9	$5.4 \rightarrow 5.8$	—	—
172	ТГ(15)-в(20)-ст(8.2)-Yb-ст(4.1)	2.2	3.4	—	—

Примечания. * $T_0 = 77$ К. Взрывчатые вещества: Т — тротил литой (плотность $\rho = 1.57$ г/см³), ТГ — сплав тротил/гексоген 50/50 ($\rho = 1.66$ г/см³), гекс — порошковый гексоген ($\rho = 1.07$ г/см³), т — порошковый тротил ($\rho = 1.0$ г/см³). Материалы слоев: Cu — медь, Д — сплав дюралюминий Д16Т, г — гетинакс, ст — стеклотекстолит, фг — фторопласт 4, орг — оргстекло, в — воздух. В скобках приведена толщина слоя в миллиметрах. Стрелка указывает на плавный характер изменения сопротивления между приведенными значениями.

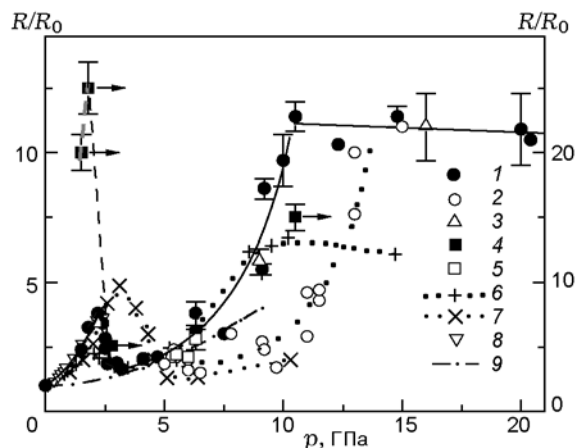


Рис. 3. Зависимость относительного электро-сопротивления иттербия от давления ударной волны:

основной массив экспериментальных данных относится к левой шкале ординат, четыре точки (темные квадраты), соответствующие сжатию в первой ударной волне при $T_0 = 77$ К, — к правой шкале ординат; цифрами обозначены данные, полученные в следующих условиях: 1 — сжатие в первой ударной волне (R_1/R_0), 2 — сжатие во второй ударной волне (R_2/R_0), 3 — нагружение измерительной ячейки через воздушный зазор, 4 — сжатие в первой ударной волне (R_1/R_0) при $T_0 = 77$ К, 5 — сжатие во второй ударной волне (R_2/R_0) при $T_0 = 77$ К, 6 — ударное сжатие образца в парафине, полиэтилене, плексигласе [14], 7 — квазиизоэнтропическое сжатие образца в стекле [18], 8 — ударное сжатие образца в оргстекле [15], 9 — оценка роста электро-сопротивления R_{1T}/R_0 вследствие теплового нагрева образца при ударном сжатии

тербия от ударного давления в первой ударной волне $R_1(p)/R_0$ (точки 1). Как видно из рис. 3, зависимость имеет сложный характер. Можно выделить следующие характерные области для этой зависимости: 1) рост сопротивления при $p < 2.2$ ГПа; 2) уменьшение сопротивления при $2.2 < p < 4$ ГПа; 3) рост сопротивления при $4 < p < 11$ ГПа; 4) слабое изменение сопротивления при $p > 11$ ГПа. Зависимости $R_1(p)/R_0$ хорошо соответствуют результаты экспериментов с использованием воздушно-го зазора между зарядом ВВ и измерительной ячейкой (точки 3).

Обсудим первый максимум электро-сопротивления на зависимости $R_1(p)/R_0$. Согласно полученным данным, при росте ударного давления электро-сопротивление иттербия сначала возрастает, достигает максимума при $p \approx 2.2$ ГПа и далее уменьшается. Эксперименты,

проведенные при начальной температуре 77 К, показали существенно больший рост электро-сопротивления по сравнению с экспериментами при 290 К. Так, относительное электро-сопротивление при $p_1 \approx 1.8$ ГПа в опыте с охлаждением составило 25 по сравнению со значением 3.3 в опыте без охлаждения. Рост сопротивления образца при уменьшении температуры свидетельствует о том, что электрическая проводимость иттербия в этой области давления носит полупроводниковый характер.

Используя эти результаты, можно оценить величину энергетической щели полупроводящего состояния иттербия. Собственная проводимость полупроводника связана с температурой выражением $\sigma \sim \exp(-\Delta E_g/2kT)$, где ΔE_g — ширина запрещенной зоны, k — константа Больцмана. Отсюда имеем выражение для отношения электро-проводностей образцов с охлаждением (σ_2) и без охлаждения (σ_1):

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \approx \exp \left[-\frac{\Delta E_g}{2k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right], \quad (1)$$

где T_2 и T_1 — температура ударно-сжатого образца с охлаждением и без него (использовались результаты расчета температур, о котором пойдет речь далее). С другой стороны, пренебрегая изменением геометрических размеров образца вследствие теплового расширения, можно записать

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \approx \frac{k_1 R_{10}}{k_2 R_{20}}, \quad (2)$$

где k_1, k_2 — экспериментальные коэффициенты увеличения сопротивления для опытов без охлаждения и с охлаждением соответственно ($k_1 \approx 3.3, k_2 \approx 25$), R_{10}/R_{20} — коэффициент роста начального электро-сопротивления образца при нагреве от температуры 77 до 290 К (в наших условиях $R_{10}/R_{20} \approx 1.67$). Объединяя формулы (1), (2) и подставляя численные значения, получаем $\Delta E_g \approx 0.02$ эВ. Таким образом, полупроводящее состояние иттербия характеризуется крайне малой величиной энергетической щели. В этой области давления об иттербии можно говорить скорее как о полуметалле.

Найденная зависимость $R_1(p)/R_0$ при $T_0 = 290$ К хорошо согласуется с данными [15], полученными в области до максимума сопротивления (точки 8 на рис. 3), и качественно — с результатами [14], полученными в более широкой области интенсивности ударной волны

(точки 6). Результаты [14, 15] соответствуют размещению иттербия в легкосжимаемых материалах (парафин, полиэтилен, оргстекло — [14], оргстекло — [15]). Сравнение данных показывает, что размещение иттербия в более «жесткой» диэлектрической обойме увеличивает сопротивление в области фазового перехода, что объясняется меньшей температурой сжатого образца и полупроводниковым характером изменения сопротивления в зависимости от температуры.

Полученная зависимость $R_1(p)/R_0$ также качественно соответствует результатам квази-изоэнтропического сжатия образца в волне с размытым фронтом в стекле [18] (точки 7). В [18] был зарегистрирован рост сопротивления до 4.9 раз, хотя максимум электросопротивления сдвинут в область больших давлений.

В диапазоне ударного давления $2.2 < p < 4$ ГПа электросопротивление иттербия уменьшается, что можно трактовать как обратный переход в металлическое состояние. Повидимому, этот переход соответствует структурному фазовому переходу, который наблюдается при статическом сжатии при $p \approx 4$ ГПа.

Обратимся к области давления $4 < p < 11$ ГПа. Здесь электросопротивление иттербия монотонно растет. Как видно из рис. 3, в этой области сопротивление иттербия при сжатии во второй ударной волне меньше, чем в первой волне (при том же давлении). Температура образца при последовательном сжатии в двух волнах меньше, чем при сжатии в одиночной ударной волне. Поэтому данные экспериментальные результаты указывают на металлический характер проводимости иттербия при $p > 4$ ГПа.

Как видно из таблицы и рис. 3, в эксперименте с охлаждением образца при $p_1 = 10.5$ ГПа относительное сопротивление R_1/R_0 больше, чем в опыте без охлаждения. Необходимо отметить, что начальное сопротивление R_0 при охлаждении образца до температуры жидкого азота уменьшается (примерно в 1.67 раза). Поэтому несмотря на то, что относительное сопротивление R_1/R_0 в опыте с охлаждением больше, чем в опыте без охлаждения, сопротивление в первом случае меньше, чем во втором. Данный результат согласуется с представлением о металлическом характере проводимости в этой области давления.

При ударном давлении ≈ 11 ГПа зависимость $R_1(p)/R_0$ резко меняет свой характер; в

области $p > 11$ ГПа сопротивление образца демонстрирует небольшое падение.

Для интерпретации полученных зависимостей $R(p)/R_0$ полезно найти температуру ударно-сжимаемых образцов. Температура иттербия оценивалась по термодинамическому уравнению энергии [21], записанному вдоль ударной адиабаты:

$$dT = \frac{V_0 - V}{2c_V} dp + \frac{p}{2c_V} dV - \gamma \frac{TdV}{V}. \quad (3)$$

Здесь V_0 — начальный удельный объем, c_V — удельная теплоемкость, γ — коэффициент Грюнайзена. В вычислениях использовалась ударная адиабата иттербия в виде зависимости волновой скорости D от массовой скорости u : $D = 1.451 + 0.836u$ ($u < 0.98$ км/с), $D = 0.875 + 1.422u$ ($u > 0.98$ км/с). Значение теплоемкости взято равным $c_V = 145$ Дж/(кг·К), коэффициента Грюнайзена — $\gamma = 1.09$ [13]. Теплотой фазовых переходов пренебрегали.

Формула (3) позволяет найти температуру образца при однократном ударном сжатии. При размещении образца в толстой диэлектрической обойме давление и температура в образце устанавливаются в последовательности ударных волн и волн разрежения. При изоэнтропической разгрузке температуру находили из уравнения $T_2 = T_1(V_2/V_1)^\gamma$.

На рис. 4 показаны расчетные зависимости температуры образца от давления ударной волны $T(p)$, а также фазовая диаграмма иттербия [13]. Иттербий является относительно легкосжимаемым металлом. Поэтому его температура при ударном сжатии достаточно быстро растет при увеличении давления. Как видно из рисунка, расчетные зависимости $T(p)$ проходят по трем областям фазовой диаграммы. В области I при повышении давления иттербий приобретает полупроводниковые свойства. Этот переход является электронным и не отмечен на фазовой диаграмме иттербия в [13]. Фазовый переход в область II сопровождается появлением металлических свойств. При большом давлении образец попадает в область расплава. При однократном ударном сжатии давление, соответствующее началу плавления, составляет ≈ 16 ГПа. Это значение хорошо соответствует излому на ударной адиабате иттербия ($p \approx 15$ ГПа [12], $p \approx 16$ ГПа [13]).

Используя найденную зависимость $T(p)$, можно оценить вклад тепловой составляющей сопротивления иттербия R_{1T}/R_0 при сжатии

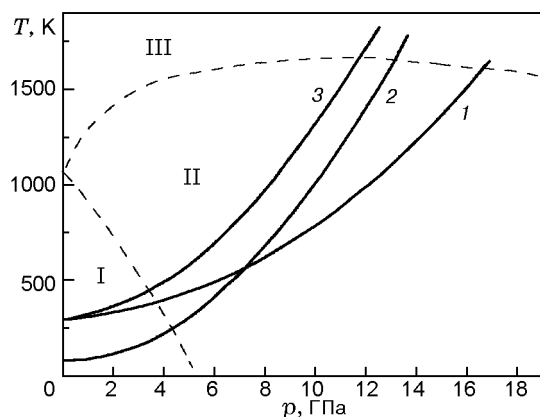


Рис. 4. Расчетные зависимости температуры иттербия от давления ударной волны и фазовая диаграмма иттербия согласно [13]:

кривые 1–3 соответствуют разным условиям нагружения: 1 — однократное сжатие образца, 2 и 3 — образец в гетинаксовой обойме, $T_0 = 77$ и 290 К соответственно; области на фазовой диаграмме: I — кубическая гранцентрированная фаза, II — кубическая объемно-центрированная фаза (металл), III — металлический расплав; штриховые кривые — линии равновесия между фазами

в первой ударной волне (штрихпунктирная кривая на рис. 3). Для этого использовалось значение температурного коэффициента сопротивления иттербия для широкого диапазона температур $\alpha = 3.6 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$ [23]. (Отметим, что это значение α близко к экспериментальному, найденному при охлаждении образца от комнатной температуры до температуры жидкого азота.) Из рис. 3 видно, что кривая тепловой составляющей сопротивления иттербия в области $3 < p < 6$ ГПа весьма близка к экспериментальной зависимости $R_1(p)/R_0$. Это означает, что практически всё изменение сопротивления иттербия в этом диапазоне давления имеет тепловую природу.

Размещение иттербия в сравнительно «мягком» материале приводит (при том же давлении в диэлектрике) к существенному разогреву образца по сравнению с режимом однократного сжатия (см. кривые 1 и 3 на рис. 4). Это связано с циркуляцией дополнительных волн в образце. При этом ударное давление, соответствующее началу плавления, уменьшается до ≈ 12 ГПа при $T_0 = 290$ К. Таким образом, анализ показывает, что при $p > 11$ ГПа ударно-сжатый иттербий находится в жидком состоянии.

Сжатие образца во второй ударной волне (см. соответствующие точки на рис. 3) при-

водит к уменьшению температуры (при том же давлении) и сопротивления, при этом плавление начинается при большем давлении. Таким образом, экспериментальные данные указывают на то, что в области больших давлений иттербий испытывает плавление. Найденная величина электропроводности иттербия при ударном давлении $p > 11$ ГПа составляет около $5 \cdot 10^3$ (Ом·см) $^{-1}$. Отметим, что электропроводность жидкого иттербия при температуре плавления и нормальном давлении равна $9 \cdot 10^3$ (Ом·см) $^{-1}$ [23, с. 190].

В свете полученных результатов возможности использования перехода металл — полупроводник в задачах электрофизики представляются весьма ограниченными. В ударно-волновых экспериментах с иттербием зарегистрирован рост сопротивления лишь в несколько раз. Увеличение сопротивления образца ограничено повышением температуры при ударном сжатии и джоулевым нагревом. В проведенных опытах плотность тока составляла $\approx 10^5$ А/мм 2 , время роста тока ≈ 60 мкс. Охлаждение образца позволяет достичь большего роста сопротивления ($R_{\max}/R_0 = 25$ при $T_0 = 77$ К). Переход к квазиизоэнтропическому сжатию совместно с понижением начальной температуры может дать более значительный эффект. Вместе с тем в эксперименте с безударным сжатием время роста сопротивления коммутатора может оказаться неприемлемо большим. Оценки показывают, что использование иттербия в качестве размыкающего элемента возможно при ограничении времени действия тока, например, в двухступенчатом коммутаторе (первая ступень — относительно медленное размыкание, вторая ступень — коммутатор на фазовом переходе).

ВЫВОДЫ

Проведенные эксперименты позволили сделать заключение о природе фазовых переходов в иттербии при ударном давлении до 20 ГПа. Ширина запрещенной зоны полупроводникового состояния иттербия оказалась очень мала (≈ 0.02 эВ), что ограничивает рост сопротивления образца в условиях ударного и джоулева нагрева. Фазовый переход в иттербии при ударном давлении $p > 11$ ГПа обусловлен плавлением образца.

Значительная часть описанных в настоящей работе экспериментов выполнена при помощи А. М. Трубочева и И. Ю. Малькова.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бриджмен П. В.** Новейшие работы в области высоких давлений. — М.: Изд-во иностр. лит., 1948.
2. **Stager R. A., Drickamer H. G.** Ytterbium effect of pressure and temperature on resistance // *Science*. — 1963. — V. 139. — P. 1284.
3. **McWhan D. B., Rice T. M., Schmidt P. H.** Metal-semiconductor transition in ytterbium and strontium at high pressure // *Phys. Rev.* — 1969. — V. 177, N 3. — P. 1063–1071.
4. **Jullien R., Jerome D.** Etude de l'ytterbium et des alliages ytterbium-barium sous haute pression a basse temperature // *J. Phys. Chem. Solids*. — 1971. — V. 32. — P. 257–265.
5. **Ramesh T. G., Shubha V., Ramaseshan S.** Phase transitions in ytterbium under pressure (semimetal-semiconductor transition) // *J. Phys. F: Met. Phys.* — 1977. — V. 7. — P. 981–990.
6. **Верещагин Л. Ф.** Твердое тело при высоких давлениях. — М.: Наука, 1981.
7. **Divakar C., Mohan M., Singh A. K.** The kinetics of pressure-induced fcc-bcc transformation in ytterbium // *J. Appl. Phys.* — 1984. — V. 56, N 8. — P. 2337–2340.
8. **Zhao Y. C., Porsch F., Holzapfel W. B.** Irregularities of ytterbium under high pressure // *Phys. Rev. B*. — 1994. — V. 49, N 2. — P. 815–817.
9. **Богуславский Ю. Я., Гончарова В. А., Ильина Г. Г.** Особенности упругого поведения иттербия при переходе полуметалл — полупроводник — полуметалл под давлением // *ЖЭТФ*. — 1995. — Т. 107, вып. 2. — С. 463–472.
10. **Chesnut G. N., Vohra Y. K.** Structural and electronic transitions in ytterbium metal to 202 GPa // *Phys. Rev. Lett.* — 1999. — V. 82, N 8. — P. 1712–1715.
11. **Баканова А. А., Дудолодов И. П., Су-тулов Ю. М.** Электронные переходы в гафнии, европии и иттербии при высоких давлениях // *Физика твердого тела*. — 1969. — Т. 11, вып. 7. — С. 1881–1884.
12. **Gust W. H., Royce E. B.** New electronic interactions in rare-earth metals at high pressure // *Phys. Rev. B*. — 1973. — V. 8, N 8. — P. 3595–3609.
13. **Carter W. J., Fritz J. N., Marsh S. P., McQueen R. G.** Hugoniot equation of state of the lanthanides // *J. Phys. Chem. Solids*. — 1975. — V. 36, N 718. — P. 741–752.
14. **Павловский М. Н.** Электросопротивление ударно-сжатого иттербия // *ЖЭТФ*. — 1977. — Т. 73, вып. 1. — С. 237–245.
15. **Gupta S. C., Gupta Y. M.** Piezoresistance of longitudinally and laterally oriented ytterbium foils to impact and quasi-static loading // *J. Appl. Phys.* — 1985. — V. 57, N 7. — P. 2464–2473.
16. **Brar N. S., Gupta Y. M.** Piezoresistance response of ytterbium foil gauges shocked to 45 kbar in fused silica matrix // *J. Appl. Phys.* — 1987. — V. 61, N 4. — P. 1304–1310.
17. **Gupta Y. M., Gupta S. C.** Incorporation of strain hardening in piezoresistance analysis: Application to ytterbium foils in a PMMA matrix // *J. Appl. Phys.* — 1987. — V. 61. — P. 489–498.
18. **Постнов В. И., Набатов С. С., Щербань А. А., Якушев В. В.** Регистрация в условиях динамического эксперимента фазовых переходов в Bi, Yb и Sn при изэнтропическом сжатии // 4-е Всесоюз. совещание по детонации: докл. — Черногловка, 1988. — Т. 1. — С. 70–75.
19. **Martinez A. R., Hooks D. E., Dick J. J.** Longitudinal and lateral ytterbium gauge measurements in PBX 9501 // *Shock Compression of Condensed Matter — 2003: Proc. of the Conf. of the Amer. Phys. Soc. Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter* / M. D. Furnish, Y. M. Gupta, J. W. Forbes (Eds). — Springer, 2004. — P. 792–795. — (AIP Conf. Proc.; V. 706).
20. **Биченков Е. И., Гилев С. Д., Трубачев А. М.** Ударно-индуцированные волны проводимости в электрофизическом эксперименте // *ПМТФ*. — 1989. — № 2. — С. 132–145.
21. **Маккуин Р., Марш С., Тейлор Дж. и др.** Уравнение состояния твердых тел по результатам исследований ударных волн // *Высокоскоростные ударные явления* / под ред. Р. Кинслоу. — М.: Мир, 1973. — С. 299–427.
22. **Гилев С. Д.** Измерение электропроводности конденсированного вещества в ударных волнах (обзор) // *Физика горения и взрыва*. — 2011. — Т. 47, № 4. — С. 3–23.
23. **Шматко О. А., Усов Ю. В.** Электрические и магнитные свойства металлов и сплавов: справочник. — Киев: Наук. думка, 1987.

Поступила в редакцию 22/III 2013 г.