

Водород в аморфных и кристаллических пленках иттербия

© В.М. Кузьменко, А.Н. Владычкин

Харьковский физико-технический институт,
310108 Харьков, Украина

(Поступила в Редакцию 29 мая 1998 г.)

Методом конденсации паров иттербия в остаточной атмосфере водорода на подложку, охлаждаемую жидким гелием, получены аморфные пленки Yb-H, содержащие до 55 at.% водорода. Исследованы некоторые термодинамические и кинетические параметры перехода этих пленок из аморфного в кристаллическое состояние ($a \rightarrow c$ -перехода), а также их электропроводность в этих состояниях. Показано, что исследованные свойства пленок Yb-H, содержащих до 40 at.% водорода, практически не отличаются от свойств пленок чистого Yb в интервале температур 4.2–293 К. Увеличение концентрации водорода до 55 at.% приводит к незначительному увеличению удельного электросопротивления, кинетической температуры и энергии активации $a \rightarrow c$ -перехода, а также к уменьшению скорости распространения фронта самоподдерживающейся лавинной (взрывной) кристаллизации. Проанализированы причины наблюдаемого влияния водорода на свойства пленок Yb-H. Изученные низкотемпературные конденсаты Yb-H в интервале температур 4.2–293 К представляют собой "замороженный" твердый раствор водорода в иттербии. Выдержка таких пленок при комнатной температуре приводит к образованию ионного дигирида иттербия YbH₂.

Конденсация паров иттербия в сверхвысоком вакууме на подложку, охлаждаемую жидким гелием, приводит к образованию аморфных пленок этого металла [1,2]. При отогреве пленок до $T_{a \rightarrow c} = 13\text{--}20$ К имеет место переход из аморфного в кристаллическое состояние ($a \rightarrow c$ -переход). При комнатной температуре никаких других фаз, кроме ГЦК Yb, в изученных пленках не обнаружено [1].

Известно, что все лантаниды, в том числе и иттербий, легко образуют гидриды. Чистые образцы металлов в соответствующих условиях гидрируются при комнатной температуре и атмосферном давлении водорода [3]. В частности, иттербий образует ионный орторомбический гидрид YbH₂ прямым воздействием чистого иттербия с водородом в обычных условиях [3,4]. Кроме того, известны два метастабильных гидрида иттербия с ГЦК-решетками: YbH_{2.55}, образующийся при повышенных температурах и давлениях водорода, и YbH₂ как результат разложения YbH_{2.55} при $T = 473\text{--}573$ К [5]. Орторомбический YbH₂ был обнаружен также в тонких пленках, полученных путем испарения Yb в обычной вакуумной камере при давлении $p \approx 1.33 \cdot 10^{-4}$ Па и комнатной температуре [6].

К настоящему времени различными методами получены и аморфные гидриды [7–9], однако случаи их образования путем низкотемпературной конденсации чистых металлов в остаточной атмосфере водорода нам не известны.

Цель настоящей работы — выяснить, возможно ли образование аморфного гидрида иттербия при конденсации его паров в остаточной атмосфере водорода на подложку, охлаждаемую жидким гелием. Если это не возможно, то как влияет водород на электропроводность аморфных и кристаллических пленок Yb при температуре от 4.2 К до комнатной и как он влияет на термодинамику и кинетику $a \rightarrow c$ -перехода.

1. Методика эксперимента

Единственным методом получения аморфных пленок чистых моноатомных металлов является конденсация их паров в сверхвысоком вакууме на охлаждаемые жидким гелием подложки. В этом процессе, если подложка способна поглотить теплоту конденсации без заметного нагрева, могут быть достигнуты скорости охлаждения до 10^{15} К/с [10].

Принцип конструкции прибора для получения и исследования чистых металлических аморфных пленок, использованный в настоящей работе, впервые был предложен Шальниковым [11]. Основной деталью прибора является стеклянная ампула (рис. 1, *a*), в которой происходят испарение и конденсация исследуемых металлов. В плоскую полированную подложку 4, которая является дном стакана 3, вварены вводы 1 из платиновой проволоки (диаметром ≈ 0.3 мм), служащие для электрических измерений сконденсированного на подложке металлического слоя. В нижней части ампулы в стекло вварены платиновые проволочки 9 для крепления вольфрамовых испарителей 7 и подвода к ним электрического тока.

Перед каждым экспериментом ампула, разрезанная по линии *сс*, тщательно промывается раствором щелочи, кислотой и струей водяного пара. После сушки ампулы на подложку одевается маска 5 с вырезами для получения одной или двух пленок (удобной для измерения формы) и монтируются испарители с помещенными в них навесками соответствующего металла. Смонтированная ампула сваривается по линии разреза *сс* и через стеклянный переходник подсоединяется к вакуумной установке для откачки. Откачанная до давления приблизительно $1.33 \cdot 10^{-4}$ Па ампула отпаивается газовой горелкой по линии *dd* и монтируется в криостате для проведения эксперимента. В процессе заливки в криостат жидкого гелия остаточный газ конденсируется главным образом в хвостовике ампулы (в районе *dd*), который охлаждается

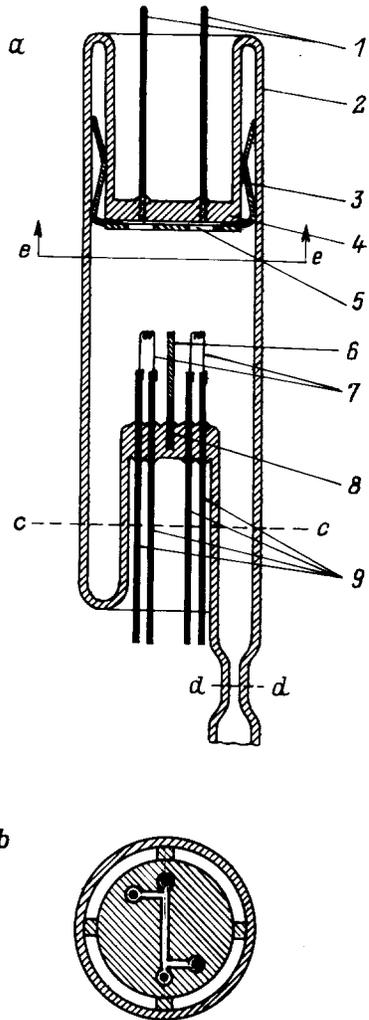


Рис. 1. Схема рабочей ампулы для получения и исследования пленок *a*: 1 — платиновые вводы для электрических измерений; 2 — корпус; 3 — стакан; 4 — полированная подложка; 5 — маска для получения пленки нужной геометрии; 6 — разделительный экран; 7 — вольфрамовые испарители; 8 — платиновый провод для крепления разделительного экрана; 9 — платиновые вводы для крепления испарителей и подвода к ним тока. *b* — вид маски по *ee*.

в первую очередь. Давление в ампуле уменьшается при этом до $\approx 10^{-10}$ Па (по гелию). Конструкция ампулы и техника эксперимента практически предотвращают конденсацию остаточного газа на подложке и стенках ампулы в районе испарителей. Таким образом, испарение и конденсация исследуемых металлов проводятся в условиях сверхвысокого вакуума, трудно достижимого при использовании других методик. Для получения более чистых пленок часть навеси испаряется при закрытой экраном подложке. Никелевый экран удерживается на подложке с помощью постоянного магнита, помещенного в стакан 3 ампулы. При удалении магнита экран падает на дно ампулы, открывая подложку для конденсации пленки.

Использованная нами методика получения низкотемпературных конденсатов металл–водород аналогична методике, описанной выше. Рабочая ампула после откачки до $p \approx 1.33 \cdot 10^{-4}$ Па заполнялась газообразным водородом при атмосферном давлении, герметически заваривалась и монтировалась в криостате. При заливке в криостат жидкого гелия водород конденсировался в хвостовике ампулы, где температура сохранялась ≈ 4.2 К в течение всего процесса получения пленок. Давление водорода соответствует упругости пара над твердым водородом при $T \approx 4.2$ К и составляет $\approx 4.67 \cdot 10^{-5}$ Па. Средняя температура пленок Yb–H в процессе их конденсации на стеклянную подложку не превышала 4.5 К.

Отношение числа атомов водорода n' к числу атомов Yb n в изученных пленках оценивалось по формуле [12]

$$\frac{n'}{n} = 4.365 \cdot 10^{-4} \frac{M}{\delta} (M'T)^{-1/2} \frac{p}{v} \gamma, \quad (1)$$

где M и M' — молярные массы Yb и H соответственно, δ — плотность пленки Yb, p — давление водорода (в Па), v — скорость конденсации иттербия (см/с), γ — коэффициент прилипания (при температуре подложки 4.5 К $\gamma \approx 0.02$ [13]).

Как отмечалось выше, для получения пленки нужной геометрии на подложку 4 одевается маска 5 из нержавеющей стали, которая удерживается на подложке с помощью пружинящих "ножек", входящих в просвет между стаканом 3 и корпусом 2 ампулы. В зависимости от цели измерения маски могут иметь различные вырезы. На рис. 1, *b* показана маска, применяемая в настоящей работе для измерений электросопротивления пленок четырехзондовым методом. Для исследования пленок в районе температур 4.2–300 К применялся метод перевернутого дьюара [14]: ампула накрывалась дьюаровским сосудом и с помощью печки, намотанной на корпус ампулы, регулировалась температура подложки. Температура (в интервале 4.2–293 К) измерялась с помощью платинового термометра сопротивления, помещенного в стакан 3 ампулы.

2. Экспериментальные результаты

Найдено, что при содержании в пленках Yb до 40 at.% водорода параметры их электрических свойств и стабильности аморфного состояния практически не отличаются от соответствующих параметров чистых пленок Yb (см. таблицу).

В таблице приведены усредненные значения параметров для 15 чистых пленок Yb (1 строка) и 6 пленок Yb–H (2 строка), из которых две содержали по ≈ 17 at.% H; две — по ≈ 25 at.% H и две — по 40 at.% H. Скорость конденсации этих пленок составляла от 0.07 до 0.24 nm/s, а толщина от 50 до 70 nm. Разброс в значениях приведенных в таблице параметров для отдельных образцов составляет $\pm 10\%$, что находится в пределах погрешности определения этих параметров. Как видно

Усредненные параметры пленок Yb и Yb-H

Состав	$\frac{n'}{n}$	$T_{a \rightarrow c}, K$	$\frac{\Delta\rho_{a \rightarrow c}}{\rho_a}, \%$	$\rho_a, \mu\Omega \cdot cm$	$\rho_{a \rightarrow c}, \mu\Omega \cdot cm$	$\rho_{300}, \mu\Omega \cdot cm$	$U_f, m/s$	$E, kJ/mol$
Yb	—	13.5	86	125	17	23	9.0	3.4 ± 0.4
Yb-H	0.2-0.7	14.5	85	127	19	$26 \rightarrow \infty$	8.3	3.4 ± 0.4
Yb-H	1.2	18	72	140	36	$31 \rightarrow \infty$	5.4	4.4 ± 0.4

Примечание. Здесь $\rho_a, \rho_{a \rightarrow c}, \rho_{300}$ — значения удельных сопротивлений пленок в аморфном состоянии, непосредственно после $a \rightarrow c$ -перехода и при $T \cong 300 K$ соответственно; U_f — скорость распространения фронта лавинной кристаллизации; E — энергия активации $a \rightarrow c$ -перехода.

из таблицы, переход из аморфного в кристаллическое состояние происходит примерно при одинаковой кинетической температуре $T_{a \rightarrow c}$ для пленок Yb и Yb-H, а соответствующий этому переходу сброс удельного сопротивления ($\Delta\rho_{a \rightarrow c}/\rho_a = (\rho_a - \rho_{a \rightarrow c})/\rho_a$) составляет 85–86%.

В 9-й колонке таблицы приведены значения энергии активации перехода атомов через границу раздела аморфной и кристаллической фаз. Они определены с помощью метода "отношения угловых коэффициентов" [15] из изотермических зависимостей ρ от времени при разных температурах отогрева одного и того же образца.

В 8-й колонке таблицы приведены значения скорости фронта лавинной кристаллизации (ЛК) пленок Yb и Yb-H. ЛК аморфных пленок инициировалась при $T = 4.2 K$ локальным импульсом тока и распространялась вдоль образца самоподдерживающимся образом за счет выделения скрытой теплоты перехода. Природа ЛК и методика определения скорости ее фронта описаны ранее [16,17]. Заметим, что для отдельных образцов как Yb, так и Yb-H скорость фронта ЛК варьировала от 7.5 до 10 m/s, что определялось, в частности, различным количеством случайных примесей (кроме водорода), попавших в пленки при конденсации. При отогреве закристаллизованных пленок Yb и Yb-H со скоростью 1–1.5 K/min температурные зависимости их сопротивлений практически не отличались вплоть до комнатной температуры. Обе серии пленок выходили на обратимый металлический ход $\rho(T)$ где-то в районе температуры 200 K, что свидетельствует о завершении релаксационных процессов, происходящих в пленках Yb при температурах ниже комнатной. Заметного влияния водорода на удельное сопротивление пленок иттербия не наблюдалось даже на фоне низких значений $\rho_{a \rightarrow c}$ (см. таблицу). Для сравнения отметим, что абсолютное увеличение ρ у ванадия, ниобия и тантала составляет при комнатной температуре от 0.7 до 1.2 $\mu\Omega \cdot cm/at.\% H$ [18].

Увеличение концентрации водорода в пленках Yb до $\approx 50 at.\%$ уже заметно сказывается на их электрических свойствах и стабильности. В 3-й строке таблицы приведены результаты для двух пленок Yb-H толщиной $\approx 93 nm$, полученных одновременно в одной ампуле со скоростью конденсации $\approx 0.04 nm/s$ и содержащих оценочно около 55 at.% водорода. Как видно из таблицы, увеличивают-

ся (по сравнению с чистыми пленками Yb) значения удельных сопротивлений в аморфном и кристаллическом состояниях, возрастает кинетическая температура кристаллизации при отогреве и уменьшается скорость распространения фронта ЛК. Кривая отогрева одной из пленок Yb-H, содержащей $\approx 55 at.\% H$, представлена на рис. 2 кривой 1. Однако и здесь отличие от поведения чистых пленок Yb только количественное, и нет практически никакого отличия от значений параметров и поведения при отогреве (или ЛК) для пленок Yb, содержащих повышенное количество чужеродных примесных атомов (но не водорода) (см. рис. 2, кривая 2). В наших экспериментах небольшое количество чужеродных примесей может попасть в пленки из-за недостаточно хорошей предварительной очистки навесок металла или подложки.

Резкие качественные изменения всех исследованных пленок Yb-H происходят в процессе их выдержки при комнатной температуре в атмосфере водорода, оставшегося в ампулах после конденсации пленок. Так, если

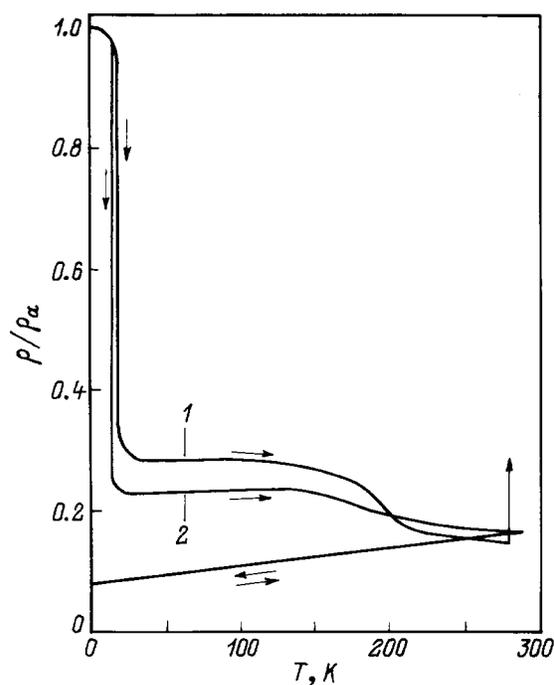


Рис. 2. Зависимость приведенного электросопротивления пленок Yb-H (1) и Yb (2) от температуры.

у пленок чистого Yb и пленок Yb, содержащих повышенное количество случайных примесей (кроме H), в процессе выдержки при комнатной температуре сопротивление слегка уменьшается за счет продолжения релаксационных процессов, то удельное сопротивление пленок Yb–H начинает быстро расти и в течение нескольких часов достигает значений, превышающих оценочно $10^4 \Omega \cdot \text{см}$. Это уже удельное сопротивление не металла, а полупроводника или изолятора. Пленки приобретают синий цвет и становятся полупрозрачными. Например, если оптическая плотность чистых пленок Yb толщиной $\approx 70 \text{ nm}$ стремится к бесконечности, то оптическая плотность пленки Yb–H толщиной 93 nm составляет всего ≈ 50 . Иногда при вскрытии ампул на воздухе происходило самовозгорание пленок Yb–H. Чистые пленки Yb пластичны: металл легко размазывается по стеклу при царапании пленки острием. Выдержанные при комнатной температуре пленки Yb–H характеризуются высокой хрупкостью. Они, в отличие от чистого Yb, слабо реагируют с азотной кислотой, но вступают в активное взаимодействие с серной.

3. Обсуждение результатов

Известно, что аморфные пленки чистых металлов проявляют обычно незначительную устойчивость относительно роста кристаллов, но добавление примесей часто задерживает этот рост [19]. Существует несколько гипотез, пытающихся объяснить механизмы стабилизации аморфного состояния металла при добавлении второго компонента [2,20,21]. По мнению Бенетта, Полка и Турнбула [20], для реализации кристаллизации примесные атомы, заполняющие поры в аморфной структуре металла, должны сместиться по крайней мере на одно межатомное расстояние. Тогда рост кристаллов будет ограничен частотой прыжков примесных атомов из одного равновесного положения в другое, что приведет, например, к более высокой степени локального порядка. Постоянная времени этого процесса τ должна быть на уровне постоянной времени диффузии или вязкого течения [21]. Авторы работы [20] считают, что в этом случае значение τ должно быть гораздо больше, чем для движения межфазной поверхности аморфное твердое тело — кристалл в чистых системах, которое может происходить путем гораздо меньших атомных смещений (по бездиффузионному механизму) [17]. По-видимому, вышеизложенное объясняет высокую стабилизирующую способность таких крупных (по сравнению с водородом) атомов внедрения, как O, N, C, B [19,21], особенно когда имеет место их сильное взаимодействие с атомами металла.

Водород стоит особняком в ряду элементов, образующих твердые растворы внедрения. Даже если он присутствует в решетке металла в атомарном виде, его размеры близки к размерам решеточных междоузлий, не

говоря уже о возможности протонного существования водорода в металле. В связи с этим коэффициент диффузии водорода в металлах, как правило, чрезвычайно велик. Например, в ванадии при комнатной температуре атом водорода совершает на 15–20 порядков больше прыжков в секунду, чем тяжелые межузельные примеси типа кислорода и азота при той же температуре [22]. При низких температурах ($< 100 \text{ K}$) диффузионная подвижность водорода по сравнению с другими примесями внедрения еще выше, поскольку становится возможной безактивационная миграция его атомов (подбарьерное туннелирование) [22–24]. Действительно, близость параметров $T_{a \rightarrow c}$ и E для пленок Yb и Yb–H и их малые значения свидетельствуют о достаточно высокой подвижности атомов водорода. Последние успевают перераспределиться в матрице иттербия даже за время столь стремительного процесса, как ЛК. Наблюдаемое уменьшение скорости фронта ЛК в аморфных пленках Yb–H, содержащих высокую концентрацию водорода (см. таблицу), может быть обусловлено, согласно теории [17], увеличением энергии активации E . Исходя из вышеизложенного, мы считаем, что слабое взаимодействие с иттербием и высокая диффузионная подвижность водорода при низких температурах — основная причина слабой стабилизирующей способности водорода в аморфной системе Yb–H.

Анализируя слабое влияние водорода на электропроводность аморфных и кристаллических пленок иттербия, можно предположить, что при низких температурах (и в процессе конденсации на холодную подложку) водород не вступает в химическое взаимодействие с иттербием, а образует с ним твердый раствор. Теоретически объяснить изменение электросопротивления внедрением растворенных атомов H очень трудно, особенно для переходных металлов. С одной стороны, увеличение числа рассеивающих центров при заметном различии рассеивающих потенциалов атомов H и Nb должно приводить к увеличению ρ с ростом концентрации водорода. С другой стороны, возможен переход электронов от внедренных атомов водорода на незаполненную d -оболочку иттербия. В этом случае при значительных концентрациях водорода может снижаться s – d -рассеяние, что способствует отрицательному вкладу в сопротивление. Представляется, что в случае пленок Yb–H определяющее влияние на удельное сопротивление оказывает рассеяние электронов проводимости на структурных дефектах, а не изменение электронного спектра иттербия под влиянием водорода. Действительно, размер кристаллитов в пленках чистых металлов непосредственно после $a \rightarrow c$ -перехода составляет $\approx 10 \text{ nm}$ [2] и плотность дефектов очень велика (не говоря уже об аморфном состоянии). Дефектность структуры пленок Yb–H с концентрацией водорода $< 40 \text{ at.}\%$ при температурах ниже комнатной, по-видимому, мало отличается от дефектности чистых пленок Yb, поэтому мало отличаются и значения удельных сопротивлений таких пленок.

Атомы водорода могут не только заселять междоузлия решетки металла, но и скапливаться вблизи структурных дефектов, формируя различные "атмосферы", а также, рекомбинируя в молекулы, вызывать сильные напряжения в кристалле, приводящие иногда к образованию макроскопических дефектов [24]. Этим обстоятельством может быть обусловлено, в частности, заметное влияние водорода на электропроводность и характеристики стабильности пленок Yb–H, содержащих более 50 at.% водорода.

Резкие качественные изменения состояния пленок Yb–H в процессе выдержки при комнатной температуре обусловлены развитием гидридного превращения. Известно, что реакция иттербия с водородом при атмосферном давлении и комнатной температуре дает только дигидрид YbH₂ с орторомбической решеткой. Известны также два метастабильных гидрида иттербия YbH_{2.55} и YbH₂. Более высокий гидрид иттербия YbH_{2.55}, приготовленный в высокодавленческих экспериментах [5], представляет собой черный порошок, имеющий структуру гранецентрированного куба. При отогреве до $T = 473\text{--}573\text{ K}$ он разлагается, переходя в ГЦК модификацию YbH₂, которая при закалке метастабильна при комнатной температуре. Отжиг ГЦК YbH₂ вызывает его переход в стабильную орторомбическую форму.

Орторомбический YbH₂-ионный гидрид, состоящий из ионов Yb²⁺ и H, и является изоструктурным ионному гидриду CaH₂ [3,5]. Характерные особенности наших пленок Yb–H, выдержанных при комнатной температуре: практически полное отсутствие проводимости, малая оптическая плотность и высокая хрупкость — типичные признаки ионного гидрида свидетельствуют, что в процессе выдержки при комнатной температуре происходит фазовый переход твердого раствора водорода в ГЦК иттербии в ионный гидрид YbH₂. При этом почти все электроны проводимости иттербия расходуются на образование гидрид-ионов H⁻, формирующих ионную связь с ионами Yb²⁺.

Общепринятые представления о природе и механизме гидридных превращений еще не сложились. Согласно современным гипотезам [25], можно полагать, что превращение (Yb–H) → YbH₂ носит диффузионно-бездиффузионный характер. Под этим понимается, что транспорт водорода к растущему зародышу гидрида, его перераспределение и упорядочение в подрешетке внедрения осуществляются диффузным путем. В то же время малые, порядка межатомных, смещения атомов металлической матрицы в процессе превращения носят кооперативный характер и осуществляются, по-видимому, бездиффузионным механизмом мартенситного типа [25]. Синий цвет дигирида иттербия в наших экспериментах может быть обусловлен наличием F-центров [3–26], что указывает на присутствие избытка металла. Предварительные рентгеноструктурные исследования подтверждают, что, кроме орторомбического YbH₂, в пленках содержится некоторое количество несвязанного металла.

Найдено, что более полное превращение происходит с участием как водорода, растворенного в иттербии, так и за счет дополнительного поступления водорода в металл из объема ампулы. Это было показано с помощью следующего дополнительного эксперимента. После получения пленок Yb–H, содержащих ≈ 35 at.%, и их кристаллизации ампула была вскрыта при $T \cong 80\text{ K}$ в атмосфере гелия. После многократной "промывки" ампулы газообразным гелием¹ пленки Yb–H выдержали в атмосфере гелия при комнатной температуре в течение суток. Быстрый рост сопротивления, а также характерные изменения цвета и прозрачности пленок свидетельствовали об образовании в них дигирида иттербия. Однако водорода, растворенного в пленках было недостаточно, и они сохранили металлическую проводимость. Здесь, по-видимому, имело место распределение включений дигирида YbH₂ в матрице ГЦК Yb. Представляется, что, если концентрация водорода в пленке будет соответствовать стехиометрическому составу дигирида, гидридное превращение пройдет во всем объеме пленки без дополнительного поступления водорода извне.

Интересно отметить, что чистая пленка Yb, помещенная в атмосферу водорода после двухчасового пребывания на воздухе, не выявила заметных признаков образования гидрида через 24 часа выдержки при комнатной температуре в этой атмосфере. Вероятно, проникновению водорода в образец препятствовала образовавшаяся на его поверхности окисная пленка.

Список литературы

- [1] Б.Г. Лазарев, В.М. Кузьменко, А.И. Судовцов, Р.Ф. Булатова. ДАН СССР **184**, 3, 587 (1969).
- [2] Ю.Ф. Комник. ФНТ **8**, 1, 3 (1982).
- [3] К. Маккей. Водородные соединения металлов. М. (1968). 244 с.
- [4] W.L. Korst, J.C. Warf. Acta Cryst. **9**, 452 (1956).
- [5] J.C. Warf, K.J. Hardcastle. Inorg. Chem. **5**, 1736 (1966).
- [6] A.E. Curzon, O.J. Singh. Less-Common Metals **39**, 227 (1975).
- [7] X.L. Yeh, K. Samwer, W.L. Johnson. Appl. Phys. Lett. **42**, 3, 242 (1983).
- [8] Р.А. Андриевский. Материаловедение гидридов. М. (1986). 128 с.
- [9] С.К. Долуханян, А.Г. Алексанян, А.Г. Акопян. и др. Abstracts 5th Int. Conf. "Hydrogen materials science and chemistry of metal hydrides". Valta (1997). P. 21.
- [10] A.S. Nowick. Comm. Sol. State Phys. **2**, 155 (1970).
- [11] A.J. Shal'nikov. Nature **142**, 74 (1938).
- [12] Х.Л. Касуэлл. В кн.: Физика тонких пленок / Под ред. Г. Хасса. М. (1967). Т. 1. Гл. 1. 343 с.
- [13] Э. Тренделенбург. Сверхвысокий вакуум. М. (1966). 286 с.
- [14] Н.В. Заварицкий. ПТЭ **2**, 140 (1956).
- [15] S. Mader, A.S. Nowick. Acta Metallurgica **15**, 2, 215 (1967).
- [16] В.М. Кузьменко, В.И. Мельников. ЖЭТФ **82**, 3, 802 (1982).
- [17] В.А. Шкловский, В.М. Кузьменко. УФН **157**, 2, 311 (1989).

¹ Проведено несколько циклов: откачка ампулы до $p \cong 0.133\text{ Pa}$ — напуск в нее гелия при атмосферном давлении.

- [18] Е. Фромм, Е. Гебхардт. Газы и углерод в металлах. М. (1980). 712 с.
- [19] В.М. Кузьменко, Б.Г. Лазарев, В.И. Мельников, А.И. Судовцов. УФЖ **21**, 6, 883 (1976).
- [20] С.H. Bennet, D.E. Polk, D. Turnbull. Acta Metallurgica **19**, 12, 1295 (1971).
- [21] К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото. Аморфные металлы. М. (1987). 328 с.
- [22] И. Фелькль, Г. Алефельд. В кн.: Водород в металлах / Под ред. Г. Алефельда и И. Фелкля. М. (1981). Т. 1. Гл. 12. 478 с.
- [23] В.А. Гольцов, В.В. Латышев, Л.И. Смирнов. В кн.: Взаимодействие водорода с металлами / Под ред. А.П. Захарова. М. (1987). Гл. 4. 296 с.
- [24] П.В. Гельд, Р.А. Рябов, Л.П. Мохрачева. Водород и физические свойства металлов и сплавов. М. (1985). 232 с.
- [25] В.А. Гольцов. В кн.: Взаимодействие водорода с металлами / Под ред. А.П. Захарова. М. (1987). Гл. 9. 296 с.
- [26] Ч. Уэрт, Р. Томсон. Физика твердого тела. М. (1969). 560 с.