

11;12

## Перспективные варианты монокристаллических вольфрамовых электродных оболочек для высокоэффективных термоэмиссионных преобразователей

© В.П. Кобяков

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН,  
142432 Черноголовка, Московская область, Россия

(Поступило в Редакцию 19 июля 2001 г. В окончательной редакции 29 января 2002 г.)

Рассмотрены варианты трубчатых монокристаллических вольфрамовых электродов с работой выхода 5.3–5.7 eV. Значительное повышение работы выхода достигается за счет применения технологий, обеспечивающих „моногранность“ цилиндрической поверхности электродов и легирования кислородом „газофазного“ эпитаксиального вольфрама.

### Введение

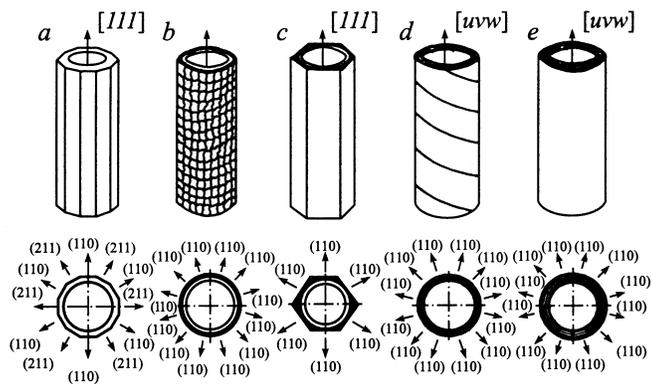
В связи с проблемой эмиссионно-активных высокотемпературных электродов, в частности, для повышения эффективности термоэмиссионных преобразователей энергии (ТЭП), в течение последней половины ушедшего столетия разрабатывались методы получения кристаллографически ориентированных вольфрамовых электродов. С точки зрения использования таких материалов в современных ТЭП с легко ионизируемой добавкой цезия в межэлектродном зазоре максимальный интерес представляла наиболее плотноупакованная грань вольфрама (110), обеспечивающая максимально высокую степень покрытия поверхности вольфрама при высокотемпературной адсорбции цезия. Пути достижения этой цели в СССР и на Западе разошлись. Для основных научных центров СССР, занятых термоэмиссионными исследованиями и разработками, базовой стала концепция вольфрамовых электродов ТЭП в виде монокристаллических труб [1]. В выборе этой концепции основную роль сыграли значительное повышение стабильности характеристик электродов и самих ТЭП, а также достигаемое при этом кардинальное решение проблемы диффузии компонентов топлива через эмиттерную оболочку ТЭП. На Западе была принята [2,3] и, по-видимому, существует до сих пор другая концепция, базирующаяся на трубчатых электродах с наружным покрытием из поликристаллического „хлоридного“ вольфрама с аксиальной текстурой  $\langle 110 \rangle$ . Принято называть эти электроды „дуплексными“, так как они содержат внутренний слой из „фторидного“ вольфрама с аксиальной текстурой  $\langle 100 \rangle$ , который формировался на бестекстурной поликристаллической молибденовой подложке. Применяемые и в том и другом случае технологии являются газофазными. В одном случае осаждение вольфрама идет из хлоридной среды (правда, на Западе в отличие от „транспортного“ технологического варианта, разработанного в СССР, использовался вариант с протоком хлоридной среды через реактор, в котором производилось осаждение вольф-

рама), в другом — из фторидной. По-видимому, выбор „дуплексной“ текстурной технологии определялся чисто экономическими соображениями, так как стоимость монокристаллов тугоплавких металлов на Западе была значительно выше, чем в СССР. Что касается эмиссионных свойств, то обе концепции вольфрамовых электродов (рис. 1, *a* — СССР, рис. 1, *b* — США и др.) в своих первоначальных вариантах оказались практически одинаковыми. Для электродов цилиндрической геометрии работа выхода в обоих случаях была на уровне 4.9–5.0 eV [2–4].

Неожиданным оказалось обнаружение [5] значительно более высокой жаропрочности монокристаллических вольфрамовых оболочек по сравнению с поликристаллическими, в том числе и текстурированными оболочками. Однако эта сторона вопроса в данном сообщении детально не обсуждается, а основное внимание сосредоточивается на перспективах улучшения эмиссионных характеристик вольфрамовых электродов ТЭП. В этом отношении за прошедшие почти 50 лет характеристики поликристаллических текстурированных вольфрамовых электродов практически не изменились, тогда как эмиссионно-адсорбционные свойства монокристаллических вольфрамовых электродов удалось существенно повысить.

### Методика экспериментов

В самом общем случае базовым вариантом монокристаллической концепции вольфрамовых электродных оболочек ТЭП является полигранная труба с осевой ориентацией [111] и соответственно с выходом на боковую цилиндрическую поверхность шести полюсов [110] (рис. 1, *a*). Термин полигранная боковая поверхность монокристаллической трубы означает, что в зависимости от осевого кристаллографического направления трубы на эту поверхность выходит тот или иной повторяющийся определенное число раз набор полюсов, составляющий кристаллографический пояс. Указанная выше осевая ориентация для ОЦК решетки является, как известно,



**Рис. 1.** Основные варианты вольфрамовых трубчатых электродов ТЭП: *a, c, d, e*, — монокристаллическая концепция (СССР, Россия); *b* — „дуплексная“ текстурная концепция (США, Европа); *a* — полигранная оболочка с осевой ориентацией  $\langle 111 \rangle$  из „хлоридного“ эпитаксиального вольфрама; *b* — поликристаллическая оболочка с первым слоем из газофазного „фторидного“ вольфрама с текстурой  $(100)$  и с наружным слоем из газофазного „хлоридного“ вольфрама с текстурой  $(110)$ ; *c* — моногранная оболочка из кислородсодержащего „хлоридного“ эпитаксиального вольфрама с самоогранкой шестью плоскостями  $(110)$ ; *d* — моногранная  $(110)$  цилиндрическая оболочка с субструктурным упрочнением, полученная из нелегированного вольфрама электронно-лучевой бестигельной зонной плавки по „деформационной“ технологии; *e* — вариант *d*, модифицированный „хлоридным“ эпитаксиальным покрытием из кислородсодержащего вольфрама. Вид сверху: зачерненный слой — „хлоридное“ покрытие; незачерненный слой — молибденовая подложка; заштрихованные области — полигонизованный, субструктурно-упрочненный слой.

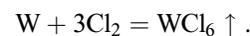
предпочтительной, так как в этом случае на боковую поверхность выходит максимально возможное число полюсов с наиболее благоприятной ориентацией  $[110]$ . Эффективная работа выхода такой трубы, как отмечалось выше, составляет 4.9–5.0 eV. Многочисленные и разнообразные попытки увеличить площадь, занимаемую на боковой поверхности полигранной трубы фасетками  $(110)$  (например, путем травления), имели ограниченный успех, тем более что термическая стабильность фасетированных поверхностей оказалась недостаточной. В связи с этим в наших работах основное внимание было сосредоточено на технологических вариантах изготовления монокристаллических вольфрамовых электродов с существенно более высокой работой выхода. Это достигалось либо путем формирования моногранных труб с ориентацией  $(110)$  в любой точке их боковой поверхности (рис. 1, *c, d, e*), либо путем легирования вольфрама активными микродобавками, о чем будет сказано ниже.

Для изготовления моногранных электродных трубчатых оболочек были разработаны два технологических варианта. В одном из них использовалось газофазное (хлоридное) эпитаксиальное осаждение вольфрама на цилиндрической молибденовой подложке с осевой ори-

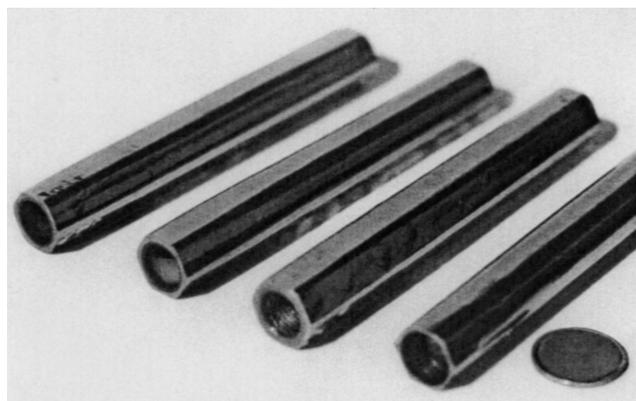
ентациями  $[111]$  в условиях самоогранения растущего осадка плоскостями  $(110)$  (рис. 1, *c* и 2). Эта технология базируется на химической транспортной реакции, основные стадии которой внутри реактора-кристаллизатора пространственно разделены [6]. На нагретой подложке при температурах 1700–1800 К идет реакция термической диссоциации хлорида и осаждается вольфрам



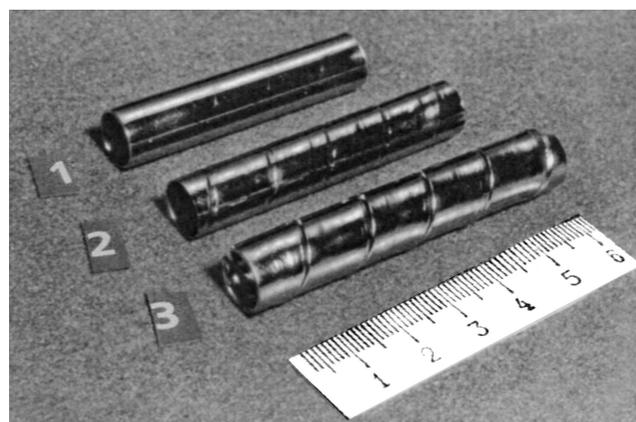
На „сырьевом“ вольфрамовом блоке при температурах 1100–1300 К идет реакция синтеза хлорида с его последующей сублимацией



После формирования эпитаксиального вольфрамового слоя молибденовая подложка вытравливалась. Наружная поверхность полученных по такой технологии вольфрамовых оболочек была шестигранной со сглаженными ребрами, внутренняя поверхность — цилиндрической.



**Рис. 2.** Внешний вид моногранных оболочек из кислородсодержащего „хлоридного“ эпитаксиального вольфрама с самоогранкой шестью плоскостями  $(110)$ .



**Рис. 3.** Внешний вид моногранных  $(110)$  цилиндрических оболочек с субструктурным упрочнением из нелегированного вольфрама электронно-лучевой бестигельной зонной плавки на разных стадиях „деформационной“ технологии: 1 — после навивки на валок-оправку, 2 — после электронно-лучевой сварки спиральным швом, 3 — после механической шлифовки и электрополировки.

В другом варианте моногранная оболочка с цилиндрической поверхностью и внутри, и снаружи формировалась путем деформации изгибом (путем навивки на валок-оправку) монокристаллической полосы с заданной ориентацией (110) с последующей электронно-лучевой сваркой заготовок спиральным швом (рис. 1, с и 3). В этом случае достигался не только 100-процентный выход на боковую поверхность оболочки наиболее эффективной грани (110), но и обеспечивалось ее структурное упрочнение. Этот вариант разрабатывался нами совместно с В.А. Кононенко и А.И. Дехтяром (Институт металлофизики НАН Украины).

В данной работе приводятся краткая технологическая информация по каждому из указанных выше перспективных технологических вариантов, а также основные результаты исследования примесного состава (ионный микрозонд, оже-спектрометр) и термоэмиссионный эффективной работы выхода образцов, измеренной методом полного тока на установке, описанной в [7]. Погрешность термоэмиссионных измерений показана на одной из температурных зависимостей, представленных и рассмотренных в следующем разделе.

## Результаты и их обсуждение

Все варианты, основанные на газофазной технологии, выполнялись в аппаратном оформлении, разработанном нами в Сухумском физико-техническом институте совместно с сотрудниками кафедры металловедения МИФИ. В части аппаратуры вклад автора данной работы состоял в том, что нам для осуществления осаждения вольфрама из хлоридной газовой среды удалось создать цельнометаллический реактор-кристаллизатор [8,9]. Разработка технологии осаждения эпитаксиального „хлоридного“ вольфрама на трубчатых монокристаллических молибденовых подложках осуществлялась нами параллельно аналогичным работам в МИФИ и в НИИ НПО „Луч“, включая и получение ограненных вольфрамовых осадков. Однако в МИФИ и НИИ НПО „Луч“ [10–12] были получены монокристаллы с огранкой плоскостями (211). В нашей работе [13] было показано, что существуют способы, позволяющие изменять индексы габитусообразующих плоскостей и выращивать с приемлемыми скоростями (до  $0.1 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{s}$ ) кристаллы, ограненные плоскостями (110). Один из таких способов состоит в легировании осаждаемого вольфрама микродобавками кислорода. В этом случае были получены монокристаллические шестигранные снаружи трубы (рис. 1, с и 2) с ориентацией граней (110). Толщина вольфрамового слоя в минимуме поперечного сечения составляла 1–2 мм. Сохранение ориентации подложки при осаждении слоев такой толщины оказалось возможным при режимах газофазной кристаллизации, которые обеспечивали соблюдение принципа пространственного согласования ориентирующего влияния подложки (эпитаксия) и ориентирующего влияния самого процесса

кристаллизации из газовой фазы (текстура) [14]. По данным микроструктурных исследований (световой и электронный микроскопы) [15] совершенство ориентации осажденного слоя при соблюдении пространственного согласования не только не ухудшается с увеличением толщины слоя, но даже имеет тенденцию к улучшению. Дислокационный ансамбль в эпитаксиальном вольфраме формировался самопроизвольно в результате накачки дислокаций несоответствия, компенсирующих различие в параметрах решетки подложки и покрытия. При этом плотность дислокаций (по ямкам травления) составляла в среднем примерно  $10^8 \text{ cm}^{-2}$ .

Исследование таких электродных оболочек с помощью ионного микрозонда (Cameca IMS-3F) [16] показало, что в случае отсутствия дополнительного введения кислорода общее содержание в них примесей не выше, чем  $10^{-2} \text{ wt}\%$ . Содержание примесей внедрения (C,N,O) составляет примерно  $10^{-5}$ – $10^{-4} \text{ wt}\%$ ; загрязнений обычного типа (Na,Mg,Al,Si,K,Ca) —  $10^{-4}$ – $10^{-3} \text{ wt}\%$ ; элементов, входящих в состав материала аппаратуры (Ti,Cr,Fe,Cu), —  $10^{-6}$ – $10^{-5} \text{ wt}\%$ . Молибден содержится на уровне  $10^{-2} \text{ wt}\%$ . В „хлоридном“ вольфраме, осаждаемом на молибденовую подложку, это — технологическая неизбежность. Однако известно [17], что присутствие даже нескольких процентов молибдена на поверхности вольфрама не приводит к изменению работы выхода. С этой точки зрения исследуемый вольфрам был достаточно чистым по всем примесям. Это подтверждалось термоэмиссионными измерениями эффективной работы выхода граней (110) исследуемых шестигранных монокристаллических оболочек, которая составляла в среднем 5.2–5.3 eV.

Введение дозированной добавки кислорода в газовую фазу процесса эпитаксиальной кристаллизации вольфрама приводило к увеличению содержания кислорода также и в твердом осадке. Оказалось, что содержание кислорода можно регулировать в довольно широких пределах ( $10^{-5}$ – $10^{-2} \text{ wt}\%$ ). Результаты по содержанию кислорода в эпитаксиальном вольфраме, полученные на ионном микрозонде и методом активации быстрыми нейтронами, удовлетворительно совпадали. Так, в образце, исследованном в [16], по данным зондирования содержалось примерно  $1.0 \cdot 10^{-3} \text{ wt}\%$  кислорода, а нейтронно-активационный анализ показал  $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ wt}\%$ . Вольфрам с повышенным содержанием кислорода было предложено называть кислородсодержащим. Как будет ясно из дальнейшего, у кислородсодержащего эпитаксиального вольфрама происходит резкое изменение эмиссионных свойств.

Было также показано [5], что размерная стабильность труб из кислородсодержащего эпитаксиального вольфрама в условиях высокотемпературной ползучести ( $T = 1870 \text{ K}$ ,  $\sigma = 10 \text{ MPa}$ ,  $\tau = 1000 \text{ h}$ ), которая в нашем случае характеризуется скоростью ползучести, лежит в пределах  $10^{-9}$ – $10^{-8} \text{ s}^{-1}$ . Такой уровень скорости криповой деформации чаще всего демонстрируется для „хлоридного“ эпитаксиального вольфрама, осажденного

на монокристаллическом молибдене. Эти достаточно низкие скорости ползучести (существенно более низкие, чем у поликристаллического вольфрама) в [5] объяснялись субструктурным упрочнением этого материала в результате самопроизвольного образования в процессе эпитаксии на молибдене полигонизованной субструктуры вольфрама за счет накачки дислокаций несоответствия, возникающих на границе покрытия и подложки.

„Деформационный“ вариант получения моногранных (110) оболочек технологически выглядел как спиральная намотка монокристаллической вольфрамовой полосы с ориентацией (110) в условиях чистого изгиба при температуре около 1000 К (рис. 1, *d* и 3). Исходная недеформированная вольфрамовая полоса получалась путем разрезки вдоль оси определенным образом ориентированных монокристаллических слитков, полученных электронно-лучевой бестигельной зонной плавкой. Соответствующие режимы электронно-лучевой сварки заготовок спиральным швом и последующей термообработки обеспечивали монокристаллическую структуру сварного шва. Рентгеноструктурные исследования показали, что такая технология позволяет изготавливать оболочки, имеющие в любой точке цилиндрической поверхности ориентацию, близкую к (110), с разориентацией соседних участков в пределах 20–30 угловых минут. При этом поперечное сечение субзерен в вольфраме не превышало 100 мкм, а плотность дислокаций составляла  $10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ .

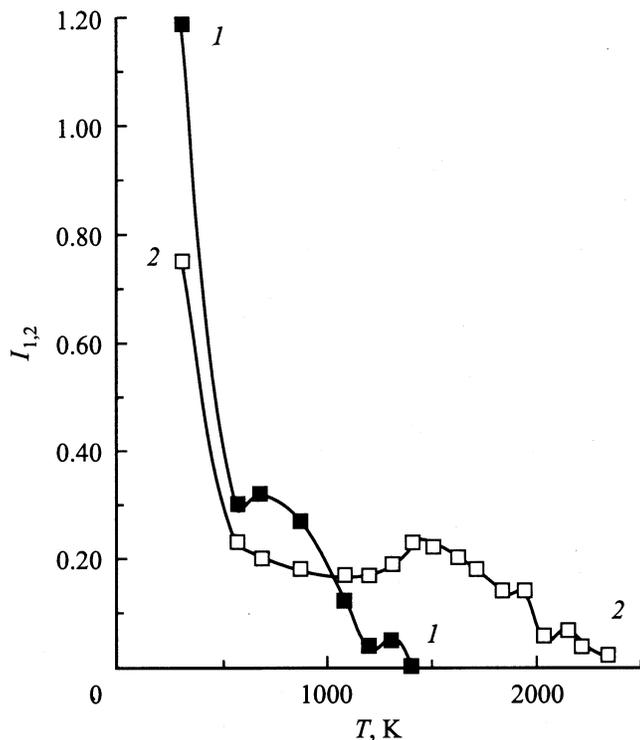
После соответствующих термообработок в деформированном изгибном вольфраме формировалась полигонизованная субструктура из дислокаций одного знака, обеспечивающая субструктурное упрочнение оболочки. По содержанию примесей этот материал практически не отличался от материала рассмотренных выше оболочек из „хлоридного“ вольфрама (без дополнительного введения кислорода), за исключением примеси молибдена, которая в данном случае практически отсутствовала. Однако эффективная работа выхода таких оболочек была не выше, чем 5.0 eV. По-видимому, это можно объяснить значительной плотностью структурных дефектов, которые формируются в материале в результате протекания в нем деформационных и полигонизационных процессов на стадиях изготовления цилиндрической моногранной оболочки. Такая работа выхода могла, казалось бы, служить ограничением перспективности варианта „деформационной“ технологии формирования цилиндрических моногранных электродных оболочек. Однако повышенная плотность дислокаций, ответственная за более низкую работу выхода [18], одновременно ответственна и за повышение адсорбционной способности поверхности такого материала, в том числе и по отношению к адсорбции пара цезия, содержащегося в межэлектродном зазоре реальных современных ТЭП. К тому же длительная стабильность таких моногранных оболочек в условиях ползучести дает им неоспоримые преимущества. Здесь стоит упомянуть о результатах проведенных в НИИ НПО „Луч“ (П.В. Зубарев и Н.Г. Тачкова)

длительных (700 h) испытаний таких оболочек на ползучесть при температуре 2070 К в условиях внутреннего давления инертного газа, эквивалентного тангенциальному распирающему усилию 10 МПа. Эти испытания показали весьма небольшую начальную деформацию (менее 0.1%) и низкую скорость установившейся ползучести ( $1.2 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ ). Испытания, проведенные в ИМФ НАН Украины [5] при тех же значениях температуры и распирающего усилия (последнее создавалось многоточечным механическим нагружением) на временной базе 2000 h, показали начальную деформацию 0.2–0.3% и рекордно низкую скорость установившейся ползучести  $10^{-11} - 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ .

Далее рассмотрим вопрос о „легировании“ монокристаллического вольфрама активной микродобавкой кислорода. Кавычки здесь поставлены для того, чтобы подчеркнуть известный факт невозможности растворения кислорода в идеальном монокристалле вольфрама в силу определенной конфигурации его внешних электронных оболочек [16]. Присутствие в реальном вольфраме структурных дефектов является причиной наличия небольшой равновесной растворимости кислорода 0.005 wt% при 1973 К [19]. Тем не менее, как было указано выше, при исследовании влияния примесей на работу выхода монокристаллического вольфрама [16,20,21] в „хлоридном“ эпитаксиальном вольфраме была обнаружена значительно более высокая растворимость кислорода.

На рис. 4 представлены результаты исследования поверхности грани (110) кислородсодержащего „хлоридного“ эпитаксиального вольфрама методом высокотемпературной оже-спектроскопии. Весьма неожиданным является то обстоятельство, что при нагреве до 1300 К происходит полное удаление углерода с поверхности вольфрама, т.е. имеет место „самоочистка“ от углерода, что для обычного вольфрама представляется совершенно невероятным событием. На кислородной кривой (кривая 2) в этом температурном интервале наблюдается широкий минимум, связанный с тем, что выходящий на поверхность кислород расходуется, по-видимому, на образование окиси углерода. Отсюда следует, что в той области температур, в которой были произведены измерения работы выхода, как те, что были приведены выше, так и те, что будут рассматриваться ниже, поверхность кристаллов кислородсодержащего вольфрама не содержала углерода, но кислород на ней присутствовал. Из данных рис. 4 видно, что по мере дальнейшего (> 1300 К) повышения температуры постепенно снижается амплитуда кислородного пика, однако вплоть до 2273 К значительная часть монослоя на поверхности кристалла остается покрытой кислородом.

В [16,20,21] была установлена корреляция между уровнями содержания примеси кислорода и термоэмиссионной работы выхода. Была предложена физическая модель, объясняющая возможность встраивания кислорода в решетку вольфрама, осаждаемого из хлоридной газовой фазы, содержащей определенное количество кислорода. Эта модель базируется на представлениях

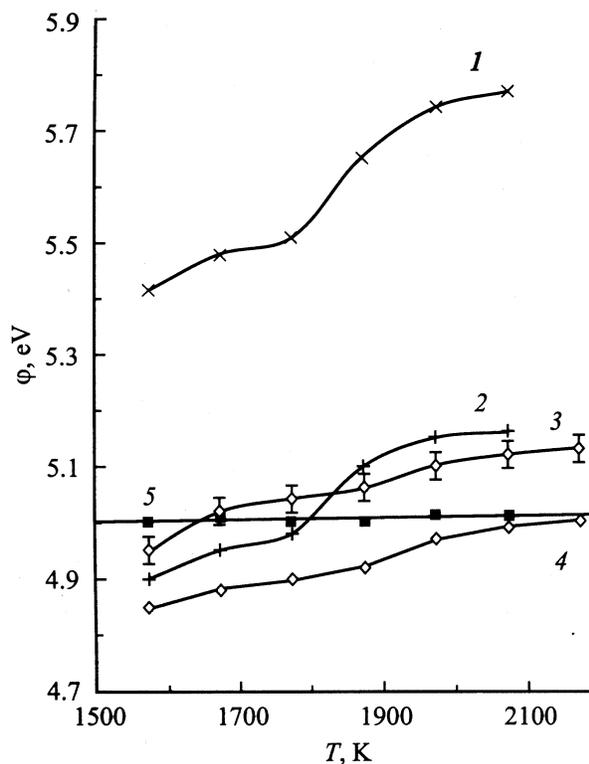


**Рис. 4.** Температурная зависимость нормированной амплитуды оже-сигналов от углерода  $I_1$  (1) и кислорода  $I_2$  (2) на поверхности фрагмента грани (110) кислородсодержащего „хлоридного“ эпитаксиального вольфрама. Нормировано по интенсивности пика вольфрама (169 eV).

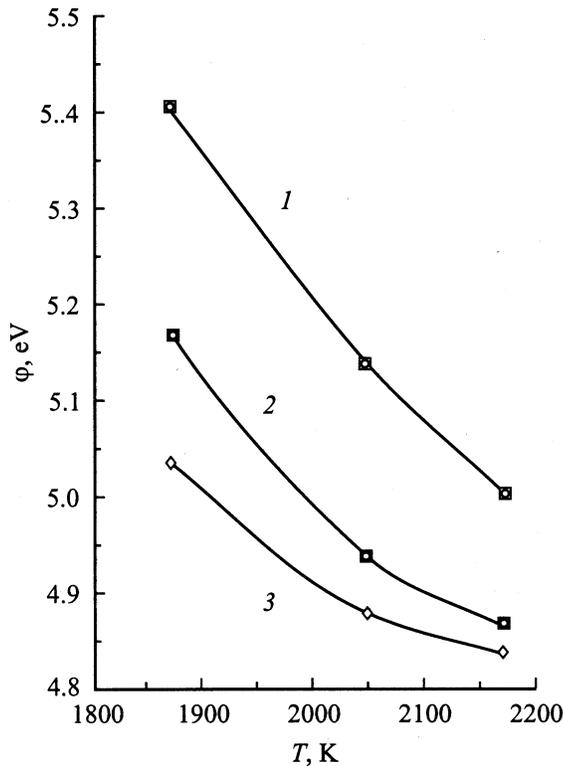
о реконструктивном образовании поверхностного субоксида вольфрама на фронте кристаллизации растущей грани и на последующем послойном „замуровывании“ кислорода в объеме растущего кристалла. Выращенные в таких условиях кристаллы вольфрама обладают существенно повышенной работой выхода. В зависимости от содержания кислорода эффективная работа выхода грани (110) такого вольфрама изменяется от табличного значения 5.3 до 5.7 eV. Характеризовать этот весьма значительный „кислородный“ эффект лучше всего температурными зависимостями (политермами) работы выхода, как например на рис. 5. Как правило, для монокристаллического вольфрама, содержащего  $> 5 \cdot 10^{-4}$  wt% кислорода, наблюдается резко возрастающая температурная зависимость работы выхода. Характерной особенностью является наличие двух, чаще всего наклонных, плато на этой зависимости: первое — в интервале температур 1700–1900 К, второе — при температурах  $> 2000$  К. Температурные зависимости работы выхода для „бескислородного“ вольфрама резко отличаются. Если соответствующие измерения выполняются в достаточно хорошем вакууме, то наблюдается обычный линейный температурный ход с ничтожным нарастанием работы выхода в интервале температур 1500–2500 К (рис. 5), как это неоднократно было показано ранее, в том числе и для „газофазного“ вольфрама [16]. Интересно, что

если „бескислородный“ вольфрам находился в момент измерения работы выхода при различных небольших парциальных давлениях кислорода, достаточных для образования каких-то долей монослоя на вольфрамовой поверхности, то наблюдалась картина (рис. 6), прямо противоположная той, которая характерна для кислородсодержащего вольфрама (рис. 5). Из данных рис. 6 видно, что в начале температурного интервала имеет место максимальный и весьма ощутимый кислородный эффект, а при повышении температуры работа выхода резко уменьшается в соответствии с усилением десорбции кислорода с поверхности вольфрама.

Проведенное рассмотрение приводит к выводу, что значительное возрастание работы выхода вольфрама с температурой присуще лишь кислородсодержащему вольфраму, полученному газофазным хлоридным методом. В соответствии с вышесказанным выход кислорода из объема вольфрама является термически активируемым процессом, и именно это определяет ход



**Рис. 5.** Политермы работы выхода образца кислородсодержащего „хлоридного“ эпитаксиального вольфрама с самогранкой шестью плоскостями (110), 1 — после выращивания, 2 — после токарной обработки до цилиндрической поверхности и электрополировки; 3, 4 — аналогичных образцов, не доведенных до конечной огранки плоскостями (110) (с полигранной боковой поверхностью); 5 — цилиндрического субструктурно-упрочненного образца из нелегированного вольфрама электронно-лучевой бестигельной зонной плавки („деформационная“ технология). Содержание в образцах кислорода (wt %): 1 —  $2.3 \cdot 10^{-2}$ , 3 —  $1.7 \cdot 10^{-2}$ , 4 —  $4.6 \cdot 10^{-3}$ , 5 —  $6.7 \cdot 10^{-5}$ .



**Рис. 6.** Политерма работы выхода грани (110) вольфрамового образца, вырезанного из монокристаллического слитка электронно-лучевой бестигельной зонной плавки, при различных парциальных давлениях кислорода из „внешнего“ источника: 1 —  $10^{-4}$ , 2 —  $10^{-5}$ , 3 —  $10^{-6}$  Па (построено по данным [22]).

температурной зависимости работы выхода кислородсодержащего вольфрама. Покидающий объем кристалла кислород в зависимости от температуры вольфрамовой поверхности образует на ней различные состояния. Как было показано в [20,23], „низкотемпературная“ ветвь политермы работы выхода (до температуры около 1800 К) определяется присутствием на поверхности вольфрама субоксида  $W_3O$ , который термически устойчив в этой температурной области, а „высокотемпературная“ ветвь ( $> 2100$  К) определяется динамическими процессами, обеспечивающими присутствие на поверхности вольфрама физадсорбированного кислорода со степенью покрытия до нескольких десятых долей монослоя, в зависимости от реальной структуры этой поверхности.

## Заключение

Из изложенного ясно, что по сути предлагаются два перспективных варианта монокристаллических вольфрамовых трубчатых электродов для высокоэффективных ТЭП. Один из них базируется на газофазной хлоридной технологии и соответственно на моногранных электродах из кислородсодержащего эпитаксиального вольфра-

ма, у которых снаружи шестигранная, а внутри цилиндрическая поверхности. Материал таких электродов при рабочих температурах ТЭП имеет работу выхода 5.6–5.7 эВ и характеризуется скоростью высокотемпературной ползучести не более  $10^{-8} \text{ s}^{-1}$ . Такие электроды могут быть использованы для конструирования термоэмиссионных модулей шестигранной геометрии, обеспечивающих плотнейшую упаковку преобразователя. При соответствующей модификации такие электроды могут применяться и в цилиндрических модулях.

Другой вариант базируется на „деформационной“ технологии, исходным сырьем для которой являются монокристаллические слитки нелегированного вольфрама электроннолучевой бестигельной зонной плавки. И наружная, и внутренняя поверхности трубчатых электродов, изготовленных по такой технологии, являются цилиндрическими. Материал таких электродов имеет работу выхода 5.0 эВ, его формоустойчивость в условиях работающего ТЭП характеризуется скоростью высокотемпературной ползучести  $10^{-9} \text{ s}^{-1}$  по одному методу испытаний и до  $10^{-11} \text{ s}^{-1}$  по другому методу.

И наконец, может быть предложен третий вариант, который является комбинацией двух рассмотренных выше (рис. 1, е). В этом случае моногранная труба по варианту рис. 1, с служит высокопрочной подложкой для осаждения слоя кислородсодержащего хлоридного эпитаксиального вольфрама с высокой работой выхода. При этом, как было показано ранее [24], упрочняющая субструктура подложки наследуется эпитаксиальным слоем.

Автор благодарен сотруднику СФТИ, „газофазных дел мастеру“ Н.И. Кущенко и сотрудникам ИМФ НАН Украины А.И. Дехтяру и посвящает светлой памяти В.А. Кононенко за многолетнее плодотворное творческое сотрудничество.

## Список литературы

- [1] Николаев Ю.В. // Тез. докл. конф. „Ядерная энергетика в космосе“. Подольск (Моск. обл.): Изд-во НПО „Луч“, 1993. С. 5.
- [2] Batzies P., Schroder-Bado P., Wahl G. // BBC-Nachr. 1972. N 1–2. S. 31–39.
- [3] Yang L., Hudson R.G., Johnson H. et al. // 3<sup>d</sup> Intern. Conf. Thermion. Electric. Power Generation. Julich (FRG), 1972. P. E-32.
- [4] Каретников Д.В., Корюкин В.А., Обрезумов В.П. // Высококачественные и монокристаллические металлические материалы. М.: Наука, 1987. С. 154–158.
- [5] Дехтяр А.И., Кобяков В.П. // Атомная энергия. 1995. Т. 79. № 1. С. 13–18.
- [6] Емельянов В.С., Евстюхин А.И., Шулов В.А. Теория процессов получения чистых металлов, сплавов и интерметаллидов. М.: Энергоатомиздат, 1983. 144 с.
- [7] Кобяков В.П. // Металлы. 2000. № 1. С. 82–86.
- [8] Кобяков В.П. // Высококачественные вещества. 1994. № 6. С. 45–53.
- [9] Кобяков В.П. // Высококачественные вещества. 1995. № 3. С. 101–107.

- [10] *Емельянов В.С., Евстюхин А.И., Шулепов А.И.* и др. Молибден в ядерной энергетике. М.: Атомиздат, 1977. 160 с.
- [11] *Евстюхин А.И., Гаврилов И.И., Яльцев В.Н.* и др. // Редкие металлы и сплавы с монокристаллической структурой. М.: Наука, 1981. С. 36–41.
- [12] *Смирнов В.П., Сидоров Ю.И., Янчур В.П.* // Поверхность. 1986. № 4. С. 123–128.
- [13] *Кобяков В.П.* // Кристаллография. 1996. Т. 41. № 3. С. 552–556.
- [14] *Бабад-Захряпин А.А., Кузнецов Г.Д.* Текстурированные высокотемпературные покрытия. М.: Атомиздат, 1980. 176 с.
- [15] *Кобяков В.П.* // Кристаллография. 1996. Т. 41. № 6. С. 1093–1098.
- [16] *Кобяков В.П., Заславский С.А.* // Высокочистые вещества. 1989. № 5. С. 75–82.
- [17] *Wahl G., Detpu J.* // IEEE Conf. Rev. Therm. Conv. Spec. 9<sup>th</sup> Annual Conf. N 4. New York, 1970. P. 95–100.
- [18] *Чайковский Э.Ф., Таран А.А.* // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. Вып. 15. С. 920–923.
- [19] *Эллиот Р.П.* Структуры двойных сплавов. Т. 2. М.: Металлургия, 1970. 472 с.
- [20] *Кобяков В.П.* // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 7. С. 161–168.
- [21] *Кобяков В.П.* // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 7. С. 169–174.
- [22] *Lieb D., Rujeh F.* // IEEE Conf. Rec. Thermionic Conv. Spec. 9<sup>th</sup> Annual Conf. New York, 1970. N 4. P. 741–780.
- [23] *Зыков Б.М., Кобяков В.П., Нардая Ю.И.* // Высокочистые вещества. 1991. № 1. С. 71–80.
- [24] *Кобяков В.П., Кононенко В.А., Дехтяр А.И.* // ДАН СССР. 1987. Т. 294. № 4. С. 856–860.