УДК 544.7 *Оригинальная статья*

Кинетика термической десорбции титанового и титан-ванадиевого газопоглотителей

А.В. Паращук, Е.П. Шешин
ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»
141701, Россия, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., 9
parashchuk.av@mipt.ru, sheshin.ep@mipt.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.730

Аннотация: Методом термодесорбционной спектроскопии исследованы процессы газовыделения из титанового и титан-ванадиевого геттеров, применяемых в электровакуумных приборах. Проведены два последовательных цикла нагрева образцов со скоростью 5°C/мин и изотермической выдержкой в конце нагрева. Рассчитаны энергии активации десорбции для H_2, H_2O, CO_2 и CH_4 по методу Редхеда. Показано, что при вторичном нагреве спустя 5 суток покоя в условиях вакуума наблюдается восстановление пиков водорода, появление новых высокотемпературных пиков воды и образование метана, отсутствовавшего при первичном нагреве. Для сплава *Ti-V* все десорбционные процессы смещены в область более низких температур (максимум 550°C) с энергией активации 2,52 эВ против 3,62 эВ для чистого титана. Установлено, что за время выдержки при комнатной температуре геттеры сорбируют водород, кислород- и углеродсодержащие газы из остаточной атмосферы, причем сорбированные компоненты вступают в химическое взаимодействие в объеме материала с образованием гидридных, карбидных и гидроксильных фаз. Полученные количественные данные могут быть использованы для оптимизации режимов тренировки геттеров, прогнозирования срока службы электровакуумных приборов и диагностики причин их отказов.

Ключевые слова: термодесорбционная спектроскопия, геттер, титан, титан-ванадиевый сплав, энергия активации, десорбция, сорбция, электровакуумные приборы, метод Редхеда.

Паращук Анастасия Владиславовна – аспирант, ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»
Шешин Евгений Павлович– д.ф.-м.н., профессор, заместитель заведующего кафедрой электроники, заведующий лабораторией вакуумной и СВЧ электроники, ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Original paper

Thermal desorption kinetics of titanium and titanium-vanadium gas absorbers

A.V. Parashchuk, E.P. Sheshin
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.730

Abstract: The processes of gas release from titanium and titanium-vanadium getter materials used in electrovacuum devices were studied using thermodesorption spectroscopy. Two consecutive heating cycles were performed at a rate of 5°C/min, followed by an isothermal annealing at the end of the heating process. The activation energies of desorption for H_2, H_2O, CO_2 and CH_4 were calculated using the Redhead method. It has been shown that during secondary heating after 5 days of keeping in a vacuum, the hydrogen peaks are restored, some new high-temperature water peaks appear, and methane is formed, which was not present during the primary heating. For the *Ti-V* alloy, all desorption processes are shifted to lower temperatures (maximum of 550°C) with an activation energy of 2,52 eV compared to 3,62 eV for pure titanium. It has been established that during exposure at

© А.В. Паращук, Е.П. Шешин, 2026

room temperature, getters sorb hydrogen, oxygen, and carbon-containing gases from the residual atmosphere, and the sorbated components enter into chemical interaction.
Keywords: thermodesorption spectroscopy, getter, titanium, titanium-vanadium alloy, activation energy, desorption, sorption, electrovacuum devices, Redhead method.

Anastasia V. Parashchuk – postgraduate student, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russian Federation, ORCID: 0009-0009-4173-9227
Evgeniy P. Shehin – Dr. Sc., Professor, Deputy Head of Department of Electronics, Head of Laboratory of Vacuum and Microwave Electronics, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), ORCID: 0000-0003-2750-4797

Поступила в редакцию/received: 20.03.2026; после рецензирования/revised: 12.04.2026; принята/accepted: 18.04.2026.

1. Методика эксперимента

Исследование проводилось методом термодесорбционной спектроскопии на образцах титанового газопоглотителя и титан-ванадиевого геттерного сплава, производимых для установки в реальный электровакуумный прибор (ЭВП). Для проведения исследований была спроектирована и собрана специализированная установка сверхвысокого вакуума, позволяющая моделировать условия, приближенные к рабочим режимам электронных приборов [1]. Базовое остаточное давление в системе поддерживалось на уровне 10^{-7} Торр. Откачной пост состоял из турбомолекулярного насоса NEXT Edwards, обеспечивающего безмасляную откачку и высокую чистоту экспериментальных условий. Контроль давления в реальном времени осуществлялся с помощью вакуумметра Пирани марки Theracont, оснащенного автоматизированной системой сбора и регистрации данных. Это позволяло синхронизировать изменения давления с температурными режимами нагрева образца.

Нагрев образцов осуществлялся равномерно со всех сторон при помощи вольфрамовой проволоки, скрученной в пружину диаметром 18 мм и отожженной при помощи водородной горелки. Образец подвешивается за вольфрамовый крючок в центре нагревательного элемента. Снизу к образцу, также в центр нагревательного элемента, исключая непосредственное касание деталей между собой, подводится термопара типа К (хромель-алюмель, ТХА). Для снижения влияния излучения стенок камеры и повышения точности измерений образец вместе с термопарой был окружен ниобиевым экраном толщиной 50 мкм. По направлению откачки в экране было вырезано отверстие диаметром 5 мм, в непосредственной близости к которому располагался квадруполь масспектрометра.

Сам эксперимент включал два последовательных цикла нагрева образцов в идентичных условиях с промежуточной выдержкой образца в вакууме. В первом цикле образец нагревался от комнатной температуры с постоянной скоростью 5°C/мин до температуры, соответствующей температуре активации геттерного материала (900°C для титана, 550°C для

сплава), после чего следовала изотермическая выдержка при 900°C в течение 20 минут. Затем образец оставался в вакуумной камере при температуре 22°C в течение пяти суток, после чего проводился повторный нагрев в том же режиме. Такой подход позволил оценить сорбционную способность материала по количеству и составу газов, выделившихся при вторичном нагреве. Выбранная скорость нагрева 5°C/мин обеспечивает полную регистрацию всех стадий фазовых превращений в исследуемых материалах, что согласуется с рекомендациями, представленными в работе [2].

Давление остаточных газов в камере не превышало 10^{-6} Торр. Состав десорбирующихся продуктов анализировался квадрупольным масс-спектрометром, регистрирующим парциальные давления масс 2 (H_2), 16 (CH_4), 18 (H_2O) и 44 (CO_2). Полученные спектры обрабатывались с применением гауссовского сглаживания для подавления шумов, после чего выделялись локальные максимумы, соответствующие пикам десорбции. Близкорасположенные пики, отстоящие друг от друга не более чем на 100 °C, объединялись в волны десорбции, что позволило соотнести каждую волну с определенным физико-химическим процессом.

Энергия активации десорбции рассчитывалась по методу Редхеда для реакций первого порядка [3]:

$$E_a = RT_{\max}(\ln\frac{\nu T_{\max}}{\beta} - 3,64),$$

где $R = 8,617\times10^{-15}$ эВ/К, $\nu = 10^{13}\ c^{-1}$ – частный фактор, β – скорость нагрева, $T_{\max}$ – температура максимума пика.

В ходе эксперимента нагрев образцов сопровождается последовательным выходом различных газов, каждый из которых имеет характерные температурные интервалы и энергии активации. Сопоставление данных, полученных при первичном и вторичном нагреве, позволило не только идентифицировать эти газы, но и проследить, каким образом геттер взаимодействует с остаточной атмосферой вакуумной камеры в периоды между циклами нагрева.

2. Обсуждение результатов.

На спектрах первичного нагрева титанового геттера (см. рис. 1) отчетливо видны три основные области десорбции — низкотемпературная (до 200°C), среднетемпературная (400-600°C) и высокотемпературная (800-900°C), связанная с изотермической выдержкой. При первичном нагреве образца, хранившегося на воздухе, первым фиксируется пик воды при 96°C. Энергия активации этого процесса составляет 1,10 эВ, что характерно для десорбции физически адсорбированной влаги с поверхности. При вторичном нагреве, после пятисуточной выдержки

образца в вакууме, этот пик полностью исчезает (см. рис. 2). Вместо него наблюдаются две новые волны десорбции воды – при 224°C (1,50 эВ) и при 326°C (1,82 эВ), а также интенсивный пик при 900°C, совпадающий с изотермической выдержкой. Как видно из сводной Таблицы 1, амплитуда высокотемпературного пика более чем в двадцать раз превышает интенсивность исходного пика воды при первичном нагреве. Наблюдаемая трансформация низкотемпературного пика воды в серию высокотемпературных пиков при вторичном нагреве согласуется с известными представлениями о том, что гидроксильные группы, образующиеся на поверхности металлов при взаимодействии водорода и кислорода, обладают более высокой термической стабильностью по сравнению с молекулярно адсорбированной водой [4]. Кроме того, как показано в работе [5], первичный нагрев до высоких температур приводит к необратимой коалесценции поверхностных наноструктур титана, что увеличивает диффузионную длину для выходящих газов и способствует закреплению сорбированных компонентов в более термически стабильных формах при последующей выдержке в вакууме. Теоретические расчеты энергии адсорбции OH-радикалов на поверхности переходных металлов дают значения 3,9-4,1 эВ [6], что близко к энергии активации высокотемпературного пика (3,62 эВ) в настоящей работе.

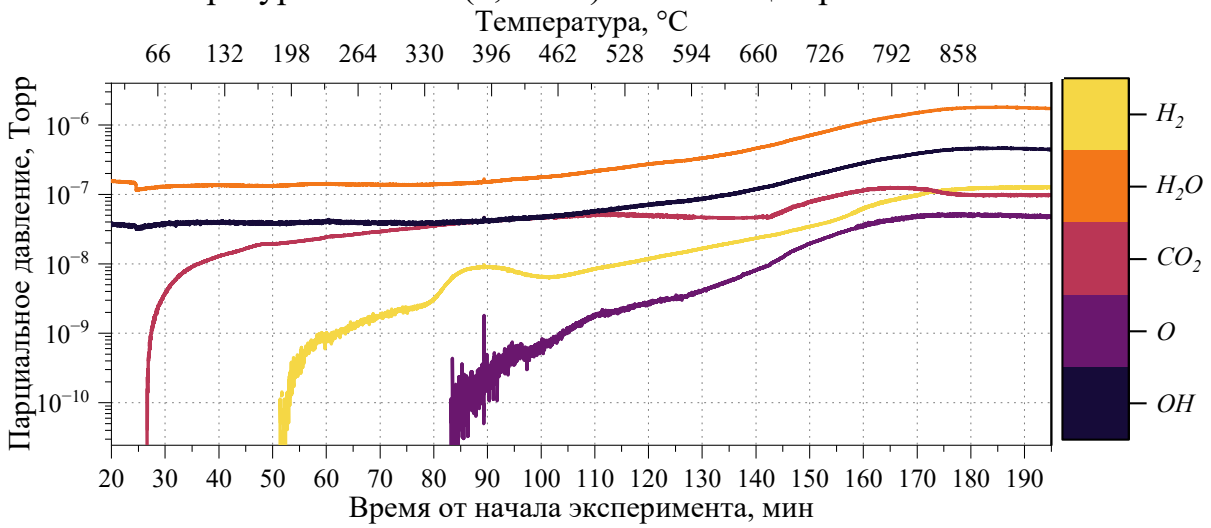

Рис. 1. Термодесорбционные спектры чистого титана при первичном нагреве: зависимость парциальных давлений от температуры. Скорость нагрева 5°C/мин, изотермическая выдержка при 900°C в течение 20 мин.

Водород в спектрах первичного нагрева чистого титана регистрируется в двух отчетливых пиках: при 459°C (2,23 эВ) и при 900°C (3,62 эВ). Первый из них обычно связывают с десорбцией водорода, растворенного в объеме металла и удерживаемого в дефектах кристаллической решетки [7, 8]. Второй, высокотемпературный пик соответствует разложению гидридных фаз ($\delta - TiH_x$), которые обладают

более высокой термической стабильностью [7, 10]. Согласно литературным данным, температура диссоциации гидридов может достигать 750-900°C и зависит от способа насыщения и предыстории образца [7]. Полученное значение энергии активации высокотемпературного пика (3,62 эВ) согласуется с результатами [9], где методом in-situ высокотемпературной рентгеновской дифракции определили энергию активации термического разложения гидрида титана на уровне 63 ± 6 кДж/моль (~0,65 эВ) для порошковых образцов, причём значительное разложение гидрида начиналось при 450°C и завершалось выше 500°C. После пяти суток в вакууме при комнатной температуре и последующего вторичного нагрева пик при 459°C полностью восстанавливается, причем его интенсивность несколько возрастает, а пик при 900°C также регистрируется с заметно большей амплитудой (см. Таблицу 1). Это наблюдение однозначно свидетельствует о том, что за время выдержки геттер сорбировал водород из остаточной атмосферы, причем сорбция происходила при комнатной температуре, без какого-либо внешнего воздействия.

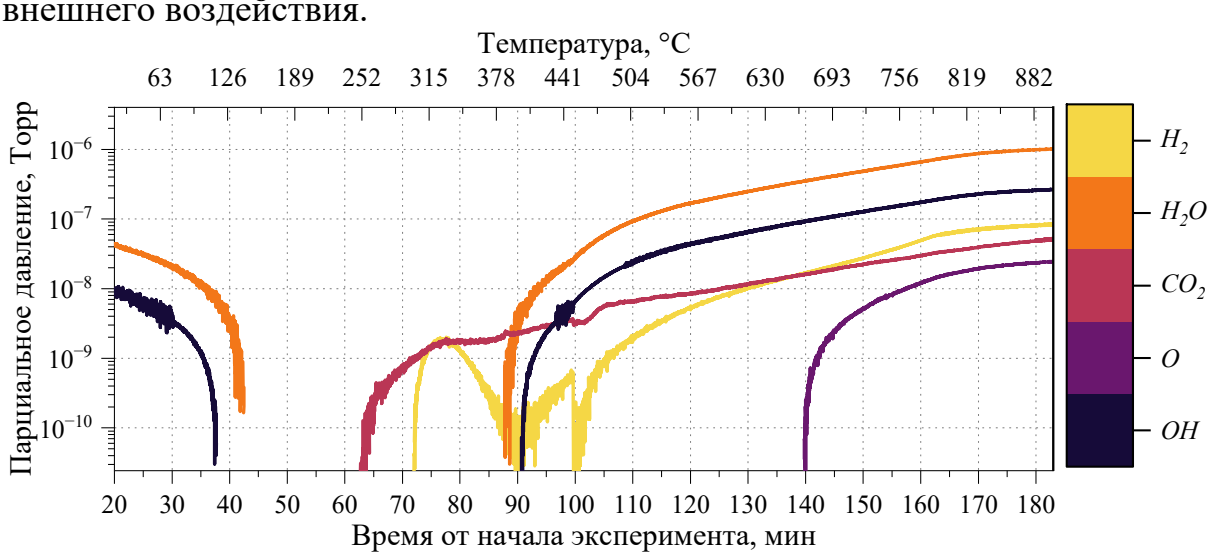

Рис. 2. Термодесорбционные спектры чистого титана при вторичном нагреве после пятисуточной выдержки в вакууме при 22°C.

Поведение углеродсодержащих газов также представляет значительный интерес. При первичном нагреве чистого титана диоксид углерода регистрируется в виде двух пиков: при 625°C (2,75 эВ) и при 900°C (3,62 эВ). Первый из них, по-видимому, связан с разложением поверхностных карбонатов, образовавшихся при контакте с атмосферой, второй – с разложением объемных карбидов. При вторичном нагреве, как следует из данных Таблицы 1, появляется дополнительный пик CO_2 при 472°C, совпадающий по температуре с пиком водорода. Такое совпадение позволяет предположить, что в объеме геттера сформировались соединения, включающие одновременно водород и углерод, например,

карбонильные комплексы. Также при вторичном же нагреве появляется отчетливый пик CH_4 при 900°C с энергией активации 3,62 эВ, совпадающей с энергией активации высокотемпературных пиков водорода и углекислого газа. Отсутствие этого же явления при активации геттера свидетельствует о том, что наблюдается результат реакции между сорбированным водородом и углеродом, источником которого служили остаточные CO или CO_2 в вакуумной камере. Образовавшийся метан, по-видимому, удерживался в объеме вплоть до температур, при которых начинается разложение карбидных и гидридных фаз.

Таблица 1. Температуры максимумов, энергии активации и интенсивности пиков десорбции для чистого титана при первичном и вторичном нагреве.

Первичный нагрев				Вторичный нагрев			
Газ	$T_{\max}$, °C	E_{active}, эВ	Высота пика, Торр	Газ	$T_{\max}$, °C	E_{active}, эВ	Высота пика, Торр
H_2	472	2,273	$9,047\times10^{-9}$	H_2	459	2,233	$1,842\times10^{-9}$
H_2	900	3,624	$1,264\times10^{-7}$	H_2	900	3,624	$8,198\times10^{-8}$
H_2O	224	1,497	$1,357\times10^{-7}$	H_2O	96	1,102	$8,086\times10^{-8}$
H_2O	326	1,816	$1,418\times10^{-7}$	CO_2	625	2,754	$6,498\times10^{-9}$
H_2O	900	3,624	$1,797\times10^{-6}$	CO_2	900	3,624	$5,073\times10^{-8}$
CO_2	742	2,273	$4,121\times10^{-8}$				
CO_2	591	2,647	$5,141\times10^{-8}$				
CO_2	864	3,509	$1,240\times10^{-7}$				
CH_4	900	3,624	$5,067\times10^{-8}$				

Таблица 2. Температуры максимумов, энергии активации и интенсивности пиков десорбции для сплава $Ti-V$ при первичном и вторичном нагреве.

Первичный нагрев				Вторичный нагрев			
Газ	$T_{\max}$, °C	E_{active}, эВ	Высота пика, Торр	Газ	$T_{\max}$, °C	E_{active}, эВ	Высота пика, Торр
H_2	383	1,994	$1,540\times10^{-9}$	H_2	550	2,517	$6,322\times10^{-9}$
H_2	550	2,517	$3,089\times10^{-8}$	H_2O	359	1,918	$5,892\times10^{-8}$
H_2O	216	1,475	$1,942\times10^{-7}$	H_2O	550	2,517	$1,137\times10^{-7}$
H_2O	440	2,172	$1,004\times10^{-7}$	CO_2	550	2,517	$3,635\times10^{-9}$
H_2O	550	2,517	$1,683\times10^{-7}$	CH_4	38	0,924	$9,946\times10^{-9}$
CO_2	550	2,517	$3,052\times10^{-8}$	CH_4	550	2,517	$2,344\times10^{-9}$
CH_4	52	0,968	$1,160\times10^{-8}$				
CH_4	550	2,517	$8,161\times10^{-9}$				

Переходя к сплаву $Ti-V$, прежде всего следует отметить смещение всей картины в область более низких температур. Если для чистого титана максимальная температура десорбции составляла 900°C, то для сплава она

не превышает 550°C, что хорошо видно на спектрах, представленных на рис. 3 и рис. 4. Энергии активации соответствующих процессов также ниже: 2,52 эВ против 3,62 эВ (см. Таблицу 2). Это вполне объяснимо, если учесть, что ванадий обладает меньшим сродством к водороду и углероду, чем титан. Введение ванадия в сплав ослабляет связи газов с матрицей, облегчая их выделение при более низких температурах [11, 12]. На спектрах первичного нагрева $Ti-V$ (см. рис. 3) видна серия пиков: метан при 52°C (0,97 эВ), вода при 216°C (1,48 эВ) и при 440°C (2,17 эВ), водород при 383°C (1,99 эВ) и при 550°C (2,52 эВ). Как следует из сводной Таблицы 2, при 550°C, на изотермической выдержке, регистрируются все газы, причем с примерно одинаковой энергией активации. Это наблюдение важно для понимания природы высокотемпературных процессов – по-видимому, при этой температуре происходит разложение сложных многокомпонентных фаз, включающих одновременно водород, углерод и кислород.

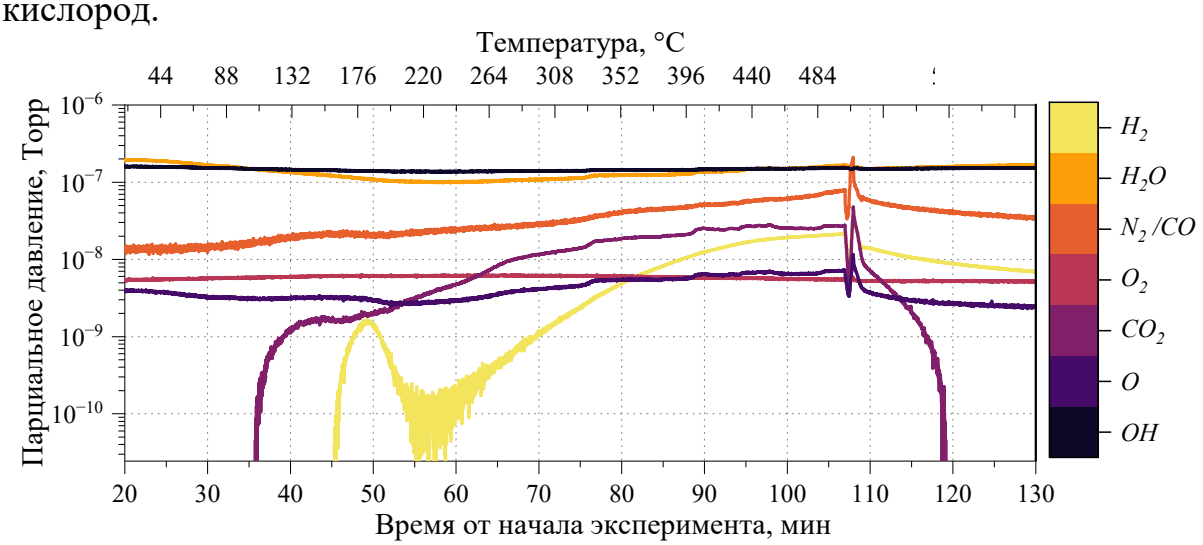

Рис. 3. Термодесорбционные спектры сплава $Ti-V$ при первичном нагреве: зависимость парциальных давлений от температуры. Скорость нагрева 5°C/мин до 550°C, изотермическая выдержка при 530°C в течение 25 мин.

После пяти суток выдержки в вакууме при комнатной температуре и вторичного нагрева сплава $Ti-V$ картина существенно упрощается. Как видно на рис. 4, пик водорода при 383°C исчезает полностью, что указывает на то, что весь водород, находившийся в этом состоянии при первичном нагреве, был удален, а новый водород, сорбированный за время выдержки, накапливается преимущественно в форме, разлагающейся при 550°C.

Интенсивность пика при 550°C при этом возрастает примерно в четыре раза. В [13] аналогичные результаты получены для сплава Ti-V-Cr, где гидридные фазы образуются уже при комнатной температуре и сохраняют стабильность вплоть до 500-600°C (момент их термического разложения). Пики воды также претерпевают изменения:

низкотемпературные компоненты при 216°C и 440°C исчезают, вместо них появляется пик при 359°C (1,92 эВ), а интенсивность пика при 550°C увеличивается. Углекислый газ при вторичном нагреве регистрируется только при 550°C с несколько меньшей интенсивностью, что может быть связано с частичным удалением углеродсодержащих фаз при первом нагреве. Метан по-прежнему наблюдается в двух формах: низкотемпературной (38°C, 0,92 эВ) и высокотемпературной (550°C, 2,52 эВ), однако интенсивность высокотемпературного пика снижается более чем в три раза.

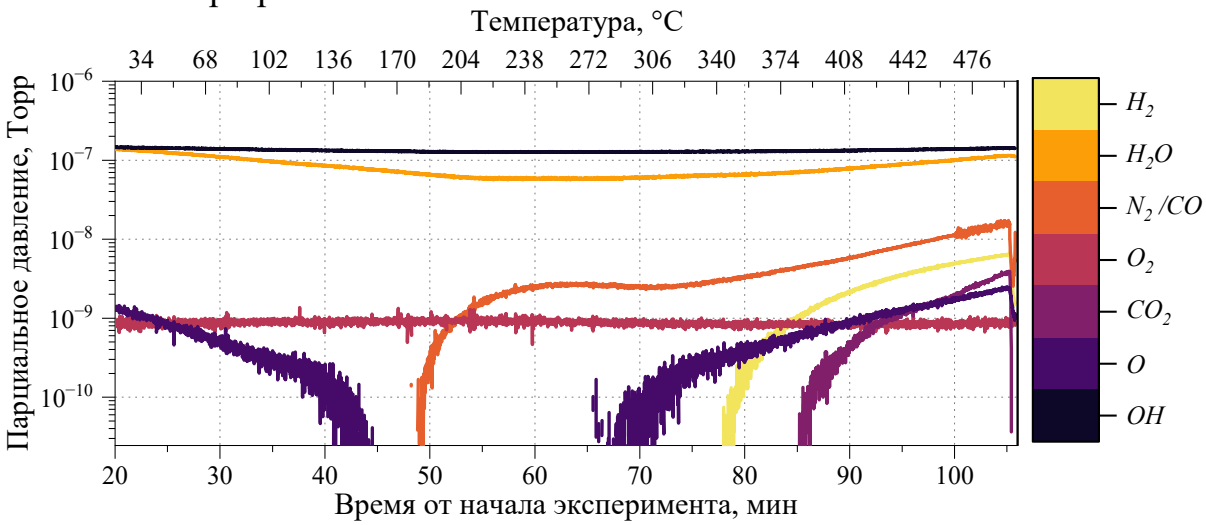

Рис. 1. Термодесорбционные спектры сплава $Ti-V$ при вторичном нагреве после пятисуточной выдержки в вакууме при 22°C.

Оценка количества сорбированного водорода, выполненная по разности интенсивностей пиков при первичном и вторичном нагреве, показывает, что за пять суток выдержки при комнатной температуре геттер поглощает порядка $10^{10}-10^{12}$ молекул H_2. В пересчете на единицу площади и время это соответствует скорости сорбции $\sim 10^{6}-10^{8}$ молекул / с·см^2, что свидетельствует о заметной сорбционной активности материала даже в отсутствие нагрева.

Важно также отметить, что сорбция не ограничивается обратимым поглощением водорода. Как следует из появления новых пиков CO_2 и CH_4 при вторичном нагреве, в объеме геттера происходят химические реакции между сорбированными газами, приводящие к образованию новых соединений. В частности, образование метана при 900°C для титана и при 550°C для сплава $Ti-V$ указывает на взаимодействие водорода с углеродом, источником которого служат, по-видимому, остаточные CO или CO_2. Это наблюдение важно для понимания долговременной деградации вакуума, поскольку метан, будучи химически инертным, не сорбируется геттером и может накапливаться в объеме прибора, ухудшая вакуумные условия.

3. Заключение

Полученные результаты позволяют более обоснованно подходить к выбору материала геттера и режимов его активации. Для приборов, работающих при высоких температурах, предпочтительнее чистый титан, сохраняющий термическую стабильность до 900°C. Для приборов с ограниченным температурным режимом больше подходит геттерный сплав $Ti-V$, обеспечивающий эффективную сорбцию при температурах не выше 550°C. Совпадение энергий активации для всех газов при изотермической выдержке может служить критерием полноты активации геттера: если после первичного нагрева пики при максимальной температуре имеют одинаковую энергию активации, материал можно считать активированным и готовым к работе. Наконец, сравнение спектров десорбции геттера из прибора, выработавшего ресурс, с эталонными спектрами, подобными полученным в данной работе, может помочь в диагностике причин отказа – например, появление метана укажет на наличие углеродсодержащих загрязнений, а рост пика воды – на нарушение герметичности.

Библиографический список:

1. **Паращук, А.В.** Разработка экспериментальной установки для исследования поверхностных явлений в электронных приборах магнетронного типа / А.В. Паращук, Е.П. Шешин, И.Ф. Ханбеков // Труды 67-й Всероссийской научной конференции МФТИ. Электроника, фотоника и молекулярная физика, 31 марта - 5 апреля 2025 г., Москва. – М: Физматкнига, 2025. – 2025. – С. 230-231.
2. **Ma, M.** Phase transformations of titanium hydride in thermal desorption process with different heating rates / M. Ma, L. Liang, L. Wang et al. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2015. – V. 40. – I. 29. – P. 8926-8934. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.05.083.
3. **Тюрин, Ю.И**. Выход водорода из никеля и палладия, стимулированный электронным пучком / Ю.И. Тюрин, И.П. Чернов, В.М. Силкин и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2018. – № 1. – С. 26-32. DOI: 10.7868/S0207352818010055.
4. **Sobyanin, V.A.** Dissociative adsorption of oxygen and hydrogen, and the formation of hydroxyl groups on the surface of Cu, Ag, Ni, Pd and Pt / V.A. Sobyanin, N.N. Bulgakov, V.V. Gorodetskii // Reaction Kinetics and Catalysis Letters. – 1977. – V. 6. – I. 2. – P. 125-132. DOI: 10.1007/BF02084187.
5. **Ben David, R.** The role of surface coarsening and sintering during thermal decomposition of titanium hydride / R. Ben David, Y. Finkelstein, E. Nativ-Roth et al. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – V. 44. – I. 12. – P. 6045-6054. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.070.
6. **Yang, H.** Energetics of hydroxyl and influence of coadsorbed oxygen on metal surfaces / H. Yang, J.L. Whitten // The Journal of Physical Chemistry B. – 1997. – V. 101. – I. 20. – P. 4090-4096. DOI: 10.1021/jp9702311.
7. **Галимов, Р.М.** Кинетика распада гидридных фаз в титановом сплаве ВТ1-0 при термическом воздействии и облучении рентгеновским пучком синхротронного излучения / Р.М. Галимов, В.Н. Кудияров, А.М. Лидер и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56. –№ 11-3. – С. 43-47.
8. **Yan, H.** In-situ scanning electron microscope thermal desorption spectroscopy (SEM-TDS) analysis of thermally-induced titanium hydride decomposition and reformation / H. Yan, J. Kim, C.C. Tasan // Acta Materialia. – 2022. – V. 226. – Art. № 117562. – 28 p DOI: 10.1016/j.actamat.2021.117562.
9. **Sandim, H.R.Z.** Kinetics of thermal decomposition of titanium hydride powder using in situ high-temperature X-ray diffraction (HTXRD) / H.R.Z. Sandim, B.V. Morante, P.A. Suzuki // Materials Research. – 2005. – V. 8. – I. 3. – P. 293-297. DOI: 10.1590/S1516-14392005000300012.
10. **Suwarno, S.** Kinetics of hydrogen absorption and desorption in titanium / S. Suwarno, V.A. Yartys // Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis. – 2017. – V. 12. – I. 3. – P. 312-317. DOI:

10.9767/bcrec.12.3.810.312-317.
11. **Qiu, J.** Interface-engineered TiV bimetal catalysts with synergistic effects for enhancing hydrogen storage performance in Mg–Ni-based material / J. Qiu, Y. Yang, H. Wan et al. // The Journal of Physical Chemistry Letters. – 2025. – V. 16. – I. 32. – P. 8084-8091. DOI: 10.1021/acs.jpclett.5c01248.
12. **Aleksanyan, A.** Hydride cycle synthesis of $Ti_{0.5}V_2Cr_{0.5}$ alloy and its composites with $ZrNi/Zr_7Ni_{10}$ additives by a novel technological approach / A. Aleksanyan, N. Sisakyan, D. Mayilyan // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2025. – V. 34. – I. 3. – P. 192-208. DOI: 10.3103/S1061386225700177.
13. **Kumar, A.** Hydrogen storage properties of $Ti_{2-x}CrVM_x$ (M = Fe, Co, Ni) alloys / A. Kumar, S. Banerjee, C.G.S. Pillai // International Journal of Hydrogen Energy. – 2013. – V. 38. – I. 30. – P. 13335-13342. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.07.096.

References:

1. Paraschuk A.V., Sheshin E.P., Khanbekov I.F. [Development of an experimental setup for studying surface phenomena in electronic devices of the magnetron type], *Proceedings of the 67th All-Russian Scientific Conference of MIPT. Electronics, Photonics, and Molecular Physics* [Trudy 67-j Vserossijskoj nauchnoj konferentsii MFTI. Elektronika, fotonika i molekulyarnaya fizika]*,* March 31 - April 5, 2025, Moscow. Moscow, Fizmatlit Publ., 2025, pp. 230-231. (In Russian).
2. Ma M., Liang L., Wang L. et al. Phase transformations of titanium hydride in thermal desorption process with different heating rates, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, vol. 40, issue 29, pp. 8926-8934. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.05.083.
3. Tyurin Y.I., Chernov I.P., Silkin V.M. et al. Electron-stimulated hydrogen desorption from nickel and palladium, *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2018, vol. 12, issue 1, pp. 21-26. DOI: 10.1134/S1027451018010184.
4. Sobyanin V.A., Bulgakov N.N., Gorodetskii V.V. Dissociative adsorption of oxygen and hydrogen, and the formation of hydroxyl groups on the surface of Cu, Ag, Ni, Pd and Pt, *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*, 1977, vol. 6, issue 2, pp. 125-132. DOI: 10.1007/BF02084187.
5. Ben David R., Finkelstein Y., Nativ-Roth E., Danon A., Cohen D., Rabkin E. The role of surface coarsening and sintering during thermal decomposition of titanium hydride, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, issue 12, pp. 6045-6054. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.070.
6. Yang H., Whitten J.L. Energetics of hydroxyl and influence of coadsorbed oxygen on metal surfaces, *The Journal of Physical Chemistry B*, 1997, vol. 101, issue 20, pp. 4090-4096. DOI: 10.1021/jp9702311.
7. Galimov R.M., Kudiyarov V.N., Lider A.M. et al. Kinetika raspada gidridnykh faz v titanovom splave VT1-0 pri termicheskom vozdejstvii i obluchenii rentgenovskim puchkom sinkhrotronnogo izlucheniya [Kinetics of decomposition of hydride phases in titanium alloy VT1-0 under thermal exposure and irradiation with an X-ray beam of synchrotron radiation], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Fizika [Russian Physics Journal]*, 2013, vol. 56, no. 11-3, pp 43-47. (In Russian).
8. Yan H., Kim J., Tasan C.C. In-situ scanning electron microscope thermal desorption spectroscopy (SEM-TDS) analysis of thermally-induced titanium hydride decomposition and reformation, *Acta Materialia,* 2022, vol. 226, art. no. 117562, 28 p. DOI: 10.1016/j.actamat.2021.117562.
9. Sandim H.R.Z., Morante B.V., Suzuki P.A. Kinetics of thermal decomposition of titanium hydride powder using in situ high-temperature X-ray diffraction (HTXRD), *Materials Research*, 2005, vol. 8, issue 3, pp. 293-297. DOI: 10.1590/S1516-14392005000300012.
10. Suwarno S., Yartys V.A. Kinetics of hydrogen absorption and desorption in titanium, *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 2017, vol. 12, issue 3, pp. 312-317. DOI: 10.9767/bcrec.12.3.810.312-317.
11. Qiu J., Yang Y., Wan H. et al. Interface-engineered TiV bimetal catalysts with synergistic effects for enhancing hydrogen storage performance in Mg–Ni-based material, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2025, vol. 16, issue 32, pp. 8084-8091. DOI: 10.1021/acs.jpclett.5c01248.
12. Aleksanyan A., Sisakyan N., Mayilyan N. Hydride cycle synthesis of $Ti_{0.5}V_2Cr_{0.5}$ alloy and its composites with $ZrNi/Zr_7Ni_{10}$ additives by a novel technological approach, International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 2025, vol. 34, issue 3, pp. 192-208. DOI: 10.3103/S1061386225700177.
13. Kumar A., Banerjee S., Pillai C.G.S., Bharadwaj S.R. Hydrogen storage properties of $Ti_{2-x}CrVM_x$ (M = Fe, Co, Ni) alloys, International Journal of Hydrogen Energy, 2013, vol. 38, issue 30, pp. 13335-13342. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.07.096.