

ЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ В ГАЗОВЫХ РАЗРЯДАХ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

И.А. Афанасьева, А.А. Бизюков, В.Н. Бориско, Д.Л. Рябчиков, Н.Н. Юнаков
Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина,
Харьков, Украина
E-mail: afaninna@i.ua

Исследованы коэффициенты ион-электронной (γ) и электрон-электронной (σ) эмиссий металлгидридов $Zr_{50}V_{50}H_x$ и $Ti_{50}V_{50}H_x$ соответственно. Установлено, что наличие водорода в сплавах приводит к изменению как величины, так и поведения коэффициентов γ и σ . Исследовано влияние плотности тока пучка ионов на изменение коэффициента γ -металлогидрида. Выявлено, что с увеличением содержания водорода в сплаве наблюдается уменьшение коэффициентов ион-электронной эмиссии для более плотных пучков первичных частиц. Проведены исследования десорбции водорода из металлгидридных электродов $Zr_{50}V_{50}H_x$ под воздействием частиц плазмы. Сделано предположение, что при взаимодействии ионов плазмы с поверхностью металлгидридного электрода происходит интенсивная десорбция водорода из металлгидрида.

1. ВВЕДЕНИЕ

В некоторых типах вакуумно-плазменных устройств необходимо создание и поддержание электрического газового разряда в среде водорода или его изотопов, горящего в замкнутом объеме [1]. Для этой цели в качестве универсальных систем газового обеспечения возможно использование обратимо поглощающих водород интерметаллических соединений редкоземельных элементов. Эти материалы могут служить как генераторами рабочего газа, так и электродами в газовом разряде.

При исследовании тлеющего разряда в режиме десорбции водорода из металлгидрида было установлено [2], что изменение характеристик разряда обусловлено изменением свойств газовой фазы. Дальнейшие эксперименты [3-4] показали, что потенциал ионизации водорода, десорбируемого из металлгидрида на 0.3...0.5 эВ ниже потенциала ионизации баллонного водорода, а отношение сечений ионизации десорбируемого и баллонного водорода в области максимума составляет 1.3...1.5, что, в свою очередь, приводит к понижению напряжения горения тлеющего разряда. Однако при исследовании разрядов в поперечном магнитном поле (пеннинговского и магнетронного типов) было показано [5], что наличие электрода (катода) из насыщенного водородом интерметаллического сплава приводит к увеличению напряжения горения таких разрядов. Поскольку потенциал горения разряда зависит от эмиссионных свойств электродов, исследование таких характеристик металлгидридных электродов представляет интерес.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В качестве исследуемых материалов использовались металлгидриды $Zr_{50}V_{50}H_x$ и $Ti_{50}V_{50}H_x$ со степенью насыщенности водородом

230 см³ (полное насыщение) и 57,5 см³ (частичное насыщение) на грамм при нормальных условиях. Металлогидриды представляли собой таблетки диаметром 20 мм и толщиной 4 мм, спрессованные из смеси порошков насыщенного водородом геттерного гидридообразующего сплава и медного наполнителя. В контрольных экспериментах использовались интерметаллические сплавы $Zr_{50}V_{50}$ и $Ti_{50}V_{50}$.

Система исследования ион-электронной эмиссии (ВИЭ) состояла из ионного источника и приемной части для первичных и вторичных частиц. В качестве источника ионов использовалась ячейка Баярда-Альперта [6]. Данный источник генерировал пучок ионов с плотностью тока 0,04...1 мкА/см². Энергия ионов пучка варьировалась в пределах 0,5...2,6 кэВ. Разброс энергий в пучке вытягиваемых ионов составлял от нескольких единиц до нескольких десятков электронвольт. Система фокусировки представляла собой одиночную электростатическую линзу. Приемная часть для первичных и вторичных частиц состояла из диафрагмы для входа и формирования пучка нужного размера, коллектора для приема вторичных частиц, а также мишени. Со стороны входа первичного пучка коллектор имел форму полусферы. Остаточное давление в камере не превышало 10⁻⁷ Торр. Рабочее давление составляло 5·10⁻⁶ Торр. Изменение газовой среды, обусловленное генерацией водорода в результате взаимодействия ионов с поверхностью металлгидрида, регистрировалось масс-спектрометром МХ-7304. Эксперимент проводился таким образом, что при измерении коэффициентов вторичной ион-электронной эмиссии выводилась информация об изменении состава газовой среды. Такое построение эксперимента позволило делать выводы относительно влияния десорбированного водорода на вторично-эмиссионные характеристики металлгидридов.

Измерения коэффициента электрон-электронной эмиссии (ВЭЭ) проводились по методике,

описанной в [7]. Экспериментальная установка представляла собой электронную пушку, мишень, регистратор вторичных электронов. Откачка производилась безмасляным способом, рабочее давление в камере составляло $5 \cdot 10^{-7}$ Торр. Энергия первичного электронного пучка варьировалась в пределах от 0 до 600 эВ. Плотность тока на мишень изменялась от 10 мкА/см^2 до 200 мА/см^2 . Анализ газовой среды осуществлялся масс-спектрометром РОМ-4. С целью калибровки экспериментальной установки и отладки методики измерения были получены коэффициенты вторичной электрон-электронной эмиссии молибдена, для различных плотностей тока первичного пучка электронов. Полученные зависимости ВЭЭ от энергии электронного пучка в интервале энергий 100...600 эВ практически совпадали с табличными данными [7] и не зависели от плотности тока пучка. В ходе эксперимента измерялась температура мишени, а также состав газовой среды в рабочей камере.

Эксперименты по исследованию десорбции металлгидридных электродов $Zr_{50}V_{50}H_x$ при взаимодействии частиц плазмы с поверхностью металлгидрида проводились с использованием несамостоятельного разряда Пеннинга. Схема экспериментальной установки представлена на Рис.1.

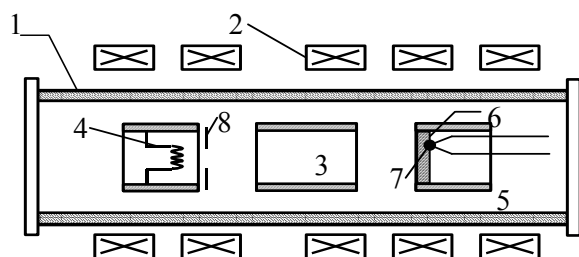


Рис.1. Схема экспериментальной установки для исследования отражательного разряда с металлгидридным катодом

Система электродов крепилась в магнитном поле (2) внутри газоразрядной камеры (1). Анод (3) газоразрядной системы, изготовленный из нержавеющей стали, представлял собой полый цилиндр. В торце катода (5), обращенного к аноду, располагался металлгидридный элемент (6). В качестве источника электронов использовался накаливаемый катод (4). От разрядного промежутка катод был отделен молибденовой диафрагмой (8) с отверстием в центре диаметром 0,6 см. Данная диафрагма одновременно выполняла роль отражательного электрода разряда Пеннинга и вытягивающего электрода для накаливаемого катода. На накаливаемый катод подавался отрицательный потенциал в пределах 0...600 В относительно отражательных катодов, находящихся под потенциалом земли. Рабочее давление водорода в вакуумной камере изменялось в пределах $5 \cdot 10^{-5}$... 10^{-2} Торр. В процессе измерений с помощью термодатчика (7) фиксировалась температура металлгидридного катода. Эксперименты проводились по следующей

схеме. В течение некоторого времени электронным пучком с плотностью тока 40 мА/см^2 и энергией 500 эВ производился предварительный разогрев МГ-катода. Затем зажигался разряд. Во время проведения этих экспериментов снимались зависимости давления и температуры металлгидридного катода от времени экспозиции.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На Рис.2. представлены зависимости коэффициентов ион-электронной эмиссии от энергии первичных частиц для интерметаллического сплава (1), 25% (2) и 100% (3) насыщенных металлгидридов.

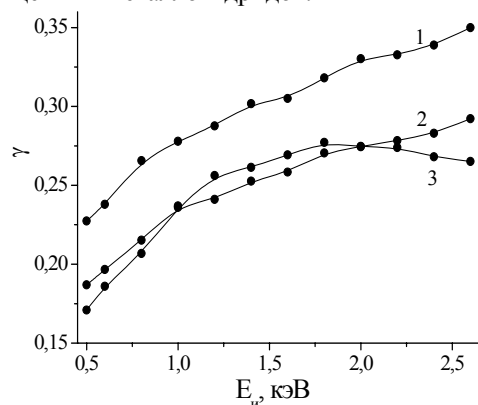


Рис.2. Зависимость коэффициента вторичной ион-электронной эмиссии от энергии первичных частиц: 1 – интерметаллический сплав; 2 – 25% насыщенный металлгидрид; 3 – 100% насыщенный металлгидрид. Плотность тока первичных частиц 1 мкА/см^2

Видно, что наличие водорода приводит к изменению как величины, так и поведения коэффициента γ . В случае интерметаллического сплава наблюдается рост коэффициента во всем интервале энергий первичных частиц. Величина коэффициента при этом изменяется в пределах 0,22...0,35. Для частично насыщенного металлгидрида происходит уменьшение величины коэффициента при неизменном поведении. В случае полностью насыщенного металлгидрида наблюдается уменьшение коэффициента γ по величине. Кроме того, при энергии первичных ионов, превышающей величину 1,8 кэВ, коэффициент меняет свое поведение.

Кривые зависимости коэффициента ион-электронной эмиссии от энергии первичных ионов для различных плотностей тока пучка ионов представлены на Рис.3. Из рисунка видно, что величина коэффициента интерметаллического сплава (см. Рис.3,а), а также его поведение как в случае малых плотностей токов (открытые кружки), так и в случае больших плотностей токов (закрытые кружки) практически совпадают. Количество водорода в камере в обоих случаях не превышало остаточного уровня. Для частично насыщенного металлгидрида увеличение плотности тока первичного пучка не

приводило к изменению поведения коэффициента (см. Рис.3,б).

Для полностью насыщенного металлгидрида энергетические зависимости коэффициента ион-электронной эмиссии для различных плотностей тока пучка ионов представлены на Рис.3,в. Видно, что при изменении энергии бомбардирующих ионов в пределах 0.5...2.0 кэВ как в случае малых плотностей токов первичных частиц, так и в случае больших плотностей токов наблюдается рост коэффициента вторичной ион-электронной эмиссии.

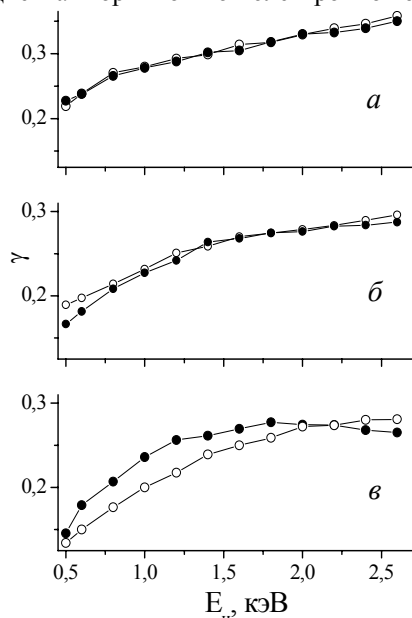


Рис.3. Зависимость коэффициента вторичной ион-электронной эмиссии от энергии первичных частиц: а – интерметаллический сплав; б – 25% насыщенный металлгидрид; в – 100% насыщенный металлгидрид. Плотность тока первичных частиц: ○ – 0.1 мкА/см², ● – 1 мкА/см²

При дальнейшем увеличении энергии бомбардирующих частиц в случае малых плотностей токов первичных частиц рост коэффициента замедляется (открытые кружки), а в случае больших плотностей тока наблюдается его уменьшение (закрытые кружки). При этом масс-спектрометрические измерения показывают увеличение количества водорода в камере. При малых плотностях тока первичных частиц количество водорода оставалось на уровне остаточного газа.

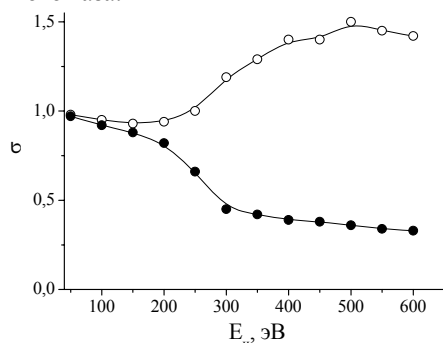


Рис.4. Зависимость коэффициента электрон-

электронной эмиссии от энергии первичных электронов: ○ – плотность тока 20 мкА/см²; ● – плотность тока 50 мА/см²

На Рис.4 представлена зависимость коэффициента электрон-электронной эмиссии от энергии первичных электронов для разных плотностей токов. Из рисунка видно, что зависимости имеют различный характер. При плотности тока первичного пучка 20 мкА/см² кривая зависимости коэффициента от энергии первичных электронов (открытые кружки) имеет традиционный вид [7] с максимумом при энергии электронов 500 эВ. При плотностях тока, превышающих значение 500 мкА/см², кривая меняет свое поведение (закрытые кружки), а среднее значение коэффициента электрон-электронной эмиссии уменьшается с ростом энергии первичного пучка электронов.

В таблице приведены результаты масс-спектрометрических измерений состава газовой среды до и после измерения энергетических зависимостей коэффициента γ .

Состав газовой среды в камере при измерении энергетических зависимостей коэффициента γ

Уровни водорода	Zr ₅₀ V ₅₀		Zr ₅₀ V ₅₀ H _x	
	До	Посл	До	Посл
H ⁺ , отн.ед	27	18	30	87
H ²⁺ , отн.ед	76	62	150	206

Из таблицы видно, что при взаимодействии пучка ионов с интерметаллическим сплавом уровень водорода в камере практически не меняется. В случае полностью насыщенного металлгидрида, взаимодействие пучка с поверхностью приводит к увеличению количества водорода в камере, что связано с десорбцией водорода из приповерхностных слоев материала. Сопоставив эти данные с результатами измерения коэффициента γ (Рис.2 и 3) можно сделать вывод, что изменение коэффициента γ металлгидридного образца (Рис.2, кривая 3 и Рис.3,в, закрытые кружки) связано с десорбцией водорода под действием пучка ионов.

На Рис.5 представлены зависимости выделения водорода (открытые кружки) и изменения температуры мишени (закрытые кружки) от времени экспозиции и различных плотностей первичного пучка электронов.

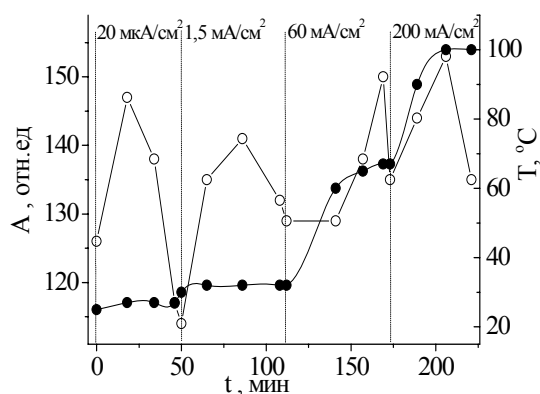


Рис.5. Выделение водорода (○) и изменение

температуры мишени (●) для разных плотностей пучка электронов

Как видно из рисунка, при взаимодействии пучка электронов с поверхностью металлгидридного сплава в первый момент времени наблюдается пик выделения водорода (открытые кружки), обусловленный физической десорбцией водорода с поверхности. Именно этот эффект мы наблюдаем при воздействии пучка электронов плотностью 20 мкА/см^2 . При этом происходит увеличение пика с дальнейшим его уменьшением ниже фонового значения, что связано с уменьшением количества водорода в приповерхностных слоях металлгидрида. Кривая зависимости коэффициента вторичной электрон-электронной эмиссии от энергии первичных электронов для данной плотности пучка имеет вид, характерный для металлов, не содержащих водород (см. Рис.4, открытые кружки). При дальнейшем увеличении плотности тока первичного пучка происходит разогрев мишени, и выделение водорода в вакуум происходит вследствие термодесорбции (см. Рис.5, закрытые кружки). Количество водорода в камере при этом увеличивается по сравнению с фоновым значением (см. Рис.5, открытые кружки). Зависимость коэффициента вторичной электрон-электронной эмиссии от энергии первичного пучка меняет свое поведение (см. Рис.4, закрытые кружки).

Таким образом, десорбция водорода из металлгидрида существенно влияет на его эмиссионные характеристики. Дальнейшие эксперименты потребовали изучения поведения металлгидрида непосредственно как разряда электрод-катод, так и влияния частиц плазмы газового разряда на десорбцию водорода. При наличии десорбции могут изменяться и эмиссионные характеристики металлгидридных электродов, что, в свою очередь, приводит к изменению и характеристик разряда.

На Рис.6 представлена зависимость давления водорода (закрытые кружки) в газоразрядной камере и температуры металлгидридного катода (открытые кружки) от времени экспозиции.

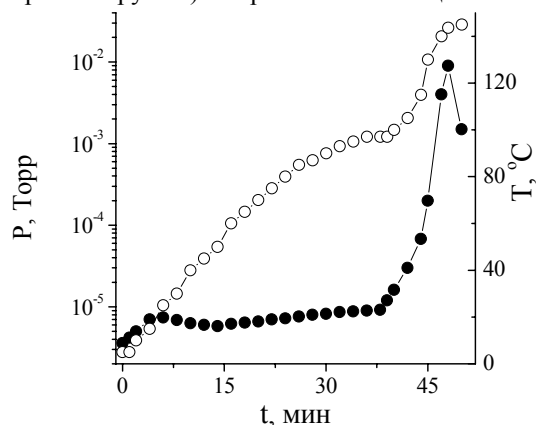


Рис.6. Зависимость давления водорода (●) в газоразрядной камере и температуры металлгидридного катода (○) от времени экспозиции

Из рисунка видно, что на кривой зависимости давления от времени по прошествии 5 мин имеется пик, по-видимому, связанный с физической десорбцией газа с поверхности катода под действием электронной бомбардировки. Дальнейшее взаимодействие пучка с катодом приводит к росту температуры катода и увеличению давления, вызванного термодесорбцией водорода. Через некоторое время (см. Рис.6, $t = 40$ мин) температура и давление стабилизировались. В этот момент зажегся разряд путем подачи на анод положительного потенциала. Наблюдался дальнейший рост температуры и увеличение давления, причем необходимо отметить скачкообразный характер изменения давления при зажигании разряда. Такое поведение давления рабочего газа невозможно объяснить только термодесорбцией водорода, так как оно не коррелирует с характером изменения температуры металлгидридного электрода. По-видимому, кроме термодесорбции появляется механизм десорбции водорода под действием высокоэнергетических частиц плазмы.

При достижении давления $8 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. разряд выключался по техническим причинам. При этом рост температуры останавливался, а давление уменьшалось, что обусловлено откачкой и геттерными свойствами материала электрода.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований определены зависимости коэффициентов ион-электронной и электрон-электронной эмиссий металлгидридов от энергии первичных частиц. Экспериментально показано, что наличие десорбции из металлгидрида под действием пучка приводит к изменению энергетических зависимостей коэффициентов.

Показано, что для разных плотностей тока первичного пучка зависимость коэффициента электрон-электронной эмиссии от энергии первичных электронов имеет различный вид. С увеличением плотности тока коэффициент уменьшается, что связано с десорбцией водорода из металлгидрида.

Сделано предположение, что при взаимодействии частиц плазмы с поверхностью металлгидридного катода происходит интенсивная десорбция водорода из металлгидрида.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.М.Гулько, А.А.Ключников, Н.Ф.Михайлов, А.Е.Шиканов. Ионно-вакуумные приборы для генерации нейтронов в электронной технике // *Техника*. 1988, с.136.
2. С.А. Галчинская, В.В. Дорохов, Н.Д. Лазарев и др. Исследование процесса "активизирования" водорода металлгидридами. I. Масс-спектроскопический анализ плазмы тлеющего разряда // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерная техника и технология»*. 1989, № 1, с.55-58.
3. С.Б. Валульская, М.В. Лотоцкий, Л.П. Скрипаль и

- др. Исследование процесса “активации” водорода металлгидридами. II. Масс-спектроскопическое определение потенциала и сечения ионизации водорода // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерная техника и технология»*. 1989, №1, с.58-61.
4. Yu.F. Shmal'ko, Ye.V. Klochko, N.V. Lototsky. Influence of isotopic effect on the shift of the ionization potential of hydrogen desorbed from metal hydride surface // *Int. J. Hydrogen energy*. 1996, v.21, p.1057-1059.
5. V.V. Borisko, I.A. Rudaya, I.N. Sereda. Peculiarities of applying reversible hydrogen getters as materials for cathodes in gas discharge devices // *PAST*. 2000, № 1, p.82-85.
6. Я. Браун. *Физика и технология источников ионов*. М.: «Мир», 1998, 150 с.
7. И.К. Кикоин. *Таблицы физических величин*. М.: «Атомиздат», 1976, 226 с.

Статья поступила в редакцию 12.05.2008 г.

THE EMISSION CHARACTERISTICS OF THE ELECTRODES METAL HYDRIDE IN GAS DISCHARGE OF LOW PRESSURE

I.A. Afanas'eva, A.A. Bizyukov, V.N. Borisko, D.L. Ryabschikov, N.N. Unakov

The ion-electronic (γ) and electron-electronic (σ) emission coefficients of metal hydride $Zr_{50}V_{50}H_x$ and $Ti_{50}V_{50}H_x$ accordingly were investigated. It is found that presence of the hydrogen in alloy brings about change values and behaviours γ - and σ -coefficients. The influence to density of the current of the beam ion on change the metal hydride γ -coefficient was investigated. It is found that with increase the contents of the hydrogen in alloy the secondary ion-electronic emission coefficients for more thick beams of the primary particles was decrease. The investigations of hydrogen desorbsion from metal hydride electrodes $Zr_{50}V_{50}H_x$ under influence of the particles of the plasma were studied. It is made suggestion that at interaction particles plasma with surface metal hydride electrode proceeds intensive hydrogen desorbsion from metal hydride.

ЭМІСІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛОГІДРИДНИХ ЕЛЕКТРОДІВ В ГАЗОВИХ РОЗРЯДАХ НИЗЬКОГО ТИСКУ

I.O. Афанасьєва, О.А. Бізюков, В.Н. Бориско, Д.Л. Рябчиков, М.М. Юнаков

Досліджені коефіцієнти іон-електронної (γ) і електрон-електронної (σ) емісії металогідридів $Zr_{50}V_{50}H_x$ і $Ti_{50}V_{50}H_x$ відповідно. Встановлено, що наявність водню в сплавах приводить до зміни як величини, так і поведінки коефіцієнтів γ і σ . Досліджений вплив щільності струму пучка іонів на зміну коефіцієнта γ металогідріда. Виявлено, що зі збільшенням змісту водню в сплаві спостерігається зменшення коефіцієнтів іон-електронної емісії для щільніших пучків первинних частинок. Проведені дослідження десорбції водню з металогідридних електродів $Zr_{50}V_{50}H_x$ під впливом частинок плазми. Зроблено припущення, що при взаємодії іонів плазми з поверхнею металогідридного електрода відбувається інтенсивна десорбція водню з металогідріда.