

# ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОГИДРИДНОГО КАТОДА В ПЕННИНГОВСКОМ ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ

*И.Н. Середя, Е.В. Клочко, А.Ф. Целуйко*

*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина*

*E-mail: igorsereda@mail.ru*

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния металлгидридного катода на эмиссионные характеристики источника ионов водорода пеннинговского типа. Изучены процессы токовой компенсации ионов, выходящих вдоль магнитного поля из такого источника. Исследованы функции распределения ионов по энергиям в зависимости от внешних параметров работы источника.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Применение металлгидридов в системах газового питания изотопами водорода вакуумно-плазменных устройств позволяет реализовывать принципиально новые схемы регулируемого “внутреннего” напуска плазмообразующего газа [1]. Согласно этой схеме металлгидридный источник водорода на основе насыщенного водородом геттерного материала используется в качестве конструктивных узлов устройств-потребителей. Такие схемы обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными системами газового питания. В этом случае осуществляется непосредственное взаимодействие поверхности металлгидрида с водородной плазмой, что способствует улучшению как технических характеристик металлгидридного источника водорода, так и вакуумно-плазменного устройства в целом [2].

В случае использования металлгидридов в качестве катодов вакуумно-плазменных устройств управляемый напуск плазмообразующего газа осуществляется за счет десорбции водорода из материала катода под воздействием ионной бомбардировки его поверхности. При этом десорбированный водород находится в активированном состоянии. Активирование водорода обусловлено колебательным возбуждением молекул  $H_2$ , которые образуются в результате рекомбинации атомов H на поверхности таких соединений, с последующим переходом в газовую фазу разряда в термодинамически неравновесном состоянии [3]. При этом потенциал ионизации десорбируемого водорода снижается на 0,5 эВ, а сечение ионизации возрастает в 1,5 раза, по сравнению с обычным молекулярным водородом, напускаемым из баллона [4].

При работе в условиях высокого вакуума наиболее перспективным является применение металлгидридов системы Zr-V. Такие интерметаллические соединения при комнатной температуре обладают равновесными давлениями, не превышающими  $10^3 \dots 10^4$  Торр, при улучшенной динамике сорбции-десорбции и водородоемкости. Максимально запасаемое количество водорода в таких соединениях достигает 230...250 см<sup>3</sup> водорода на грамм сплава при нормальных условиях. Разложение гидридных фаз этих материалов позволяет обеспечивать напуск изотопов водорода в интервале рабочих температур 400...900 К, а само выделение газа протекает равно-

мерно.

Однако контакт поверхности металлгидрида с плазмой, необходимый для эффективного управления десорбцией из него водорода, приводит к взаимному влиянию процессов поглощения-выделения водорода металлгидридным катодом и характеристик плазмообразующей ступени источника. Это существенно затрудняет идентификацию физических процессов, протекающих в таких устройствах, и поэтому некоторые полученные экспериментальные результаты не получили однозначной интерпретации и носят противоречивый характер.

В данной работе анализируются и обобщаются приведенные авторами экспериментальные исследования, направленные на изучение влияния металлгидридных катодов на характеристики ионного источника пеннинговского типа.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования проводились в пеннинговском разряде с катодом, изготовленным из геттерного гидридоносодержащего состава  $Zr_{50}V_{50}H_x$  с различной степенью насыщенности его материала водородом. Применяемый в экспериментах образец поглощает от 210 до 235 см<sup>3</sup>/г водорода при давлении водорода 1...2 атм и комнатной температуре. Это соответствует стехиометрическому составу гидрида  $ZrH_2 + ZrV_2H_x$ , где  $x = 3,34 \dots 4,12$ , и валовому атомному отношению “водород / металл”  $H/M = 1,34 \dots 1,53$ . Для сравнительных измерений использовались катоды из меди. Рабочим газом служил водород, который напускался из баллона. Схема и описание экспериментальной установки приведена в [5].

На Рис.1 показаны кривые термодесорбции водорода из гидрированного образца сплава [6]. Различные степени насыщенности водородом соответствуют начальным значениям  $H/M = 1,532$  (100% насыщение),  $H/M = 1,335$  (87% насыщение) и  $H/M = 0,65$  (~50% насыщение). При 100% насыщенности металлгидрида водородом десорбция из него водорода в области температур 100...400°C существенно неравномерна. Однако выработка порядка 13% водорода приводит к тому, что выделение водорода становится практически равномерным в том же интервале температур с тенденцией к росту скорости выделения по мере повышения температуры вплоть до 586 °C (см. Рис.1, кривая  $H/M = 1,335$ ).

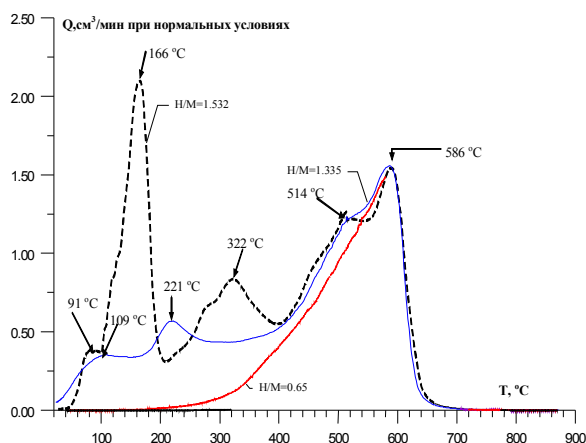


Рис.1. Дифференциальная кривая термодесорбции водорода из гидрированного образца  $Zr_{50}V_{50}H_x$  с различными начальными концентрациями водорода

Полученные результаты качественно согласуются с данными работы [7], в которых первая стадия газовой выделения объясняется разложением интерметаллического гидроксида  $ZrV_2H_x$ , а вторая – разложением гидроксида циркония. Для образца с  $(H/M)=0,65$  (стехиометрический состав  $ZrH_2+ZrV_2H_{0,60}$ ) интенсивность выделения водорода из интерметаллической фазы незначительна, и основная часть водорода выделяется из  $ZrH_x$  в температурном интервале 400...650°C.

Параметры плазмы, исследованные в работе [8], показали, что в случае применения катода с максимальной начальной степенью насыщенности водородом ( $H/M=1.4$ ) наблюдается значительное возрастание плотности плазмы на оси разряда. Авторы объясняют это формированием потока водорода, имеющего большую плотность в приосевой области разряда под воздействием интенсивной бомбардировки поверхности катода ионами из плазмы. Увеличение плотности, а также большие потенциалы горения разряда при низких давлениях приводящие к сильному ускорению ионов, позволяют эффективно применять этот разряд в качестве ионного источника.

При низких давлениях водорода в камере, в условиях извлечения ионного тока в аксиальном направлении, влияние металлгидридного катода начинает сказываться начиная со значений давлений  $4 \cdot 10^{-5}$  Торр. Это проиллюстрировано на Рис.2, где представлены функции распределения ионов по энергиям, извлекаемых вдоль магнитного поля через отверстие в центре одного из катодов. Как видно из рисунка, при использовании медного катода функция распределения имеет один ярко выраженный максимум в области энергий 1,1 кэВ, что составляет 0,55 от разрядного напряжения (см. Рис.2, кривая 1). В случае использования металлгидрида в качестве материала катода разряда происходит уширение функции распределения ионов по энергиям (см. Рис.2, кривая 2). При этом на фоне высокоэнергетического максимума в области энергий 1,1 кэВ появляется дополнительный “низкоэнергетичный” пик на функции распределения с максимумом в районе 600 эВ, который наблюдался во всем диапазоне ис-

следованных давлений. Положение “высокоэнергетичного” максимума для металлгидридного катода совпадает с положением максимума наиболее вероятной энергии для ионов, бомбардирующих медный катод.

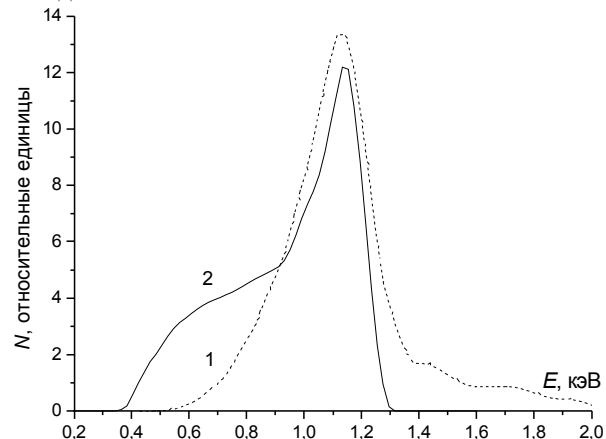


Рис.2. Функции распределения ионов по энергиям, извлекаемых вдоль магнитного поля из отражательного разряда при  $H = 600$  Э;  $U_p = 2$  кВ;  $P = 4 \cdot 10^{-5}$  Торр, 1 – медный катод; 2 – катод из металлгидрида

Наличие “низкоэнергетичного” пика на функции распределения ионов по энергиям в случае применения металлгидридного катода нельзя объяснить только увеличением доли ионов атомарного водорода  $H^+$  в разрядах с металлгидридными электродами, которая не превышает значения в 0,01% [9]. Поэтому естественно связать появление данного пика с ионами водорода, десорбируемого из металлгидридного катода.

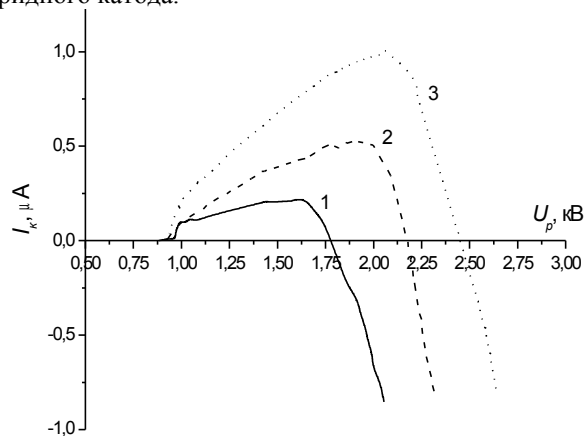


Рис.3. Зависимости тока с коллектора, установленного за отверстием по центру максимально насыщенного водородом металлгидридного катода, от разрядного напряжения при  $P = 3 \cdot 10^{-4}$  Торр, 1 –  $H = 600$  Э; 2 –  $H = 800$  Э; 3 –  $H = 1000$  Э

Увеличение потока десорбируемого водорода из металлгидрида за счет повышения плотности ионного тока на катоде приводит к переходу разряда в режим эмиссии электронов в аксиальном направлении. Увеличение скорости десорбции может достигаться за счет увеличения мощности, вводимой в разряд, либо за счет повышения давления в камере. При этом в диапазоне давлений  $0,4...7 \cdot 10^{-5}$

<sup>4</sup> Торр выход электронов происходит только со стороны насыщенного водородом металлгидридного катода (второй катод изготовлен из меди). На Рис.3 приведены типичные зависимости тока на коллектор, установленный за металлгидридным катодом, от величины разрядного напряжения. Металлогидридный катод имел максимальную степень насыщенности водородом. Исследования с 75% насыщенностью были проведены в работе [5].

Как видно из этого рисунка, при превышении разрядным напряжением некоторого порогового значения наблюдается практически линейное уменьшение положительного тока на коллектор. Дальнейшее увеличение напряжения разряда ведет к полной токовой компенсации и смене знака тока извлекаемых частиц. Величины пороговых напряжений (при которых на коллектор идет максимальный положительный ток) и напряжений, при которых происходит полная токовая компенсация, зависят от давления водорода в камере, величины магнитного поля и степени насыщенности водородом металлгидрида. Для достижения полной токовой компенсации с ростом давления требуется увеличение разрядного напряжения или напряженности магнитного поля.

В случае применения металлгидридного катода с 50% насыщением водородом характер зависимости тока на коллектор от разрядного напряжения не отличался от аналогичной зависимости для разряда с катодами, не содержащими гидридных фаз [5] во всем диапазоне рабочих давлений и значений напряженности магнитного поля. Это связано с тем, что оставшийся в материале водород характеризуется большой энергией связи с кристаллической решеткой [7] и его интенсивная десорбция в условиях наших экспериментов затруднена.

Поскольку выход электронов наблюдается только со стороны металлгидридного катода при высокой концентрации водорода в катоде, то, очевидно, определяющую роль в процессе токовой компенсации извлекаемого ионного тока играет десорбированный из металлгидрида водород.

Это может быть обусловлено следующими причинами. Десорбция водорода, вызванная ионной бомбардировкой поверхности металлгидрида, приводит к локальному повышению концентрации нейтрального газа в приповерхностной области и соответственно к повышению эффективности ионизации и плотности ионов в этой области. Это может способствовать преодолению электронами потенциального барьера и аксиальному выходу их из разряда, что приводит к токовой компенсации тока на коллектор.

Как было показано в нашей предыдущей работе [5], распределение по энергиям выходящих электронов практически не меняется во всем диапазоне исследованных параметров разряда и не зависит от степени насыщенности водородом металлгидридного катода. Наиболее вероятная энергия электронов при этом составляла величину порядка 100 эВ.

Исследования же энергетических спектров ионов, приходящих на коллектор, позволили вы-

явить ряд особенностей. Показано, что в случае замены медного катода металлгидридным функция распределения по энергиям выходящих ионов существенно зависит от степени насыщения последнего.

Использование катода с 50% насыщением не приводит к качественным изменениям характера функции распределения ионов по сравнению со случаем медных катодов. При этом функция распределения ионов по энергиям имеет колоколообразный вид с максимумом, соответствующим примерно половине разрядного напряжения. С повышением содержания водорода в катоде характер функции распределения существенно меняется.

В случае полностью насыщенного водородом металлгидридного катода функции распределения ионов по энергиям приведены на Рис.4. Кривая 1 соответствует максимальному положительному значению тока на коллектор. Функция распределения в режиме токовой компенсации описывается кривой 2. Кривая 3 – при отрицательных значениях тока на коллектор. Видно, что с увеличением разрядного напряжения наблюдается существенное снижение энергии приходящих ионов.

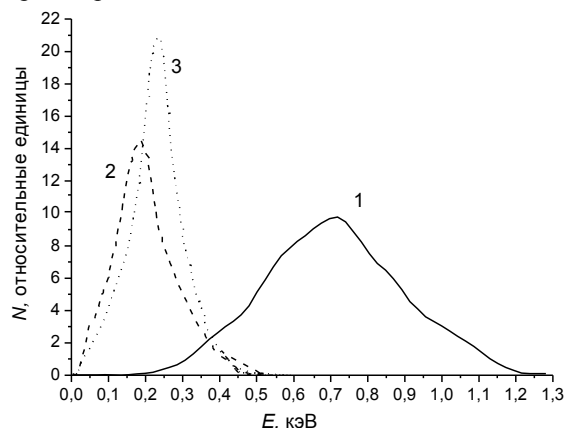


Рис.4. Функции распределения ионов по энергиям, выходящих вдоль магнитного поля через отверстие в центре металлгидридного катода (максимальное насыщение) при  $P = 3 \cdot 10^{-4}$  Торр и  $H = 800$  Э:

1 – точка максимального положительного значения тока на коллектор при  $U_p = 2$  кВ;

2 – точка компенсации при  $U_p = 2,2$  кВ;

3 – точка отрицательного тока при  $U_p = 2,3$  кВ

При максимальном положительном токе на коллектор функция распределения по энергиям ионов имеет максимум в районе 700 эВ (кривая 1), что соответствует 0,35 от разрядного напряжения. В точке полной токовой компенсации наиболее вероятная энергия существенно уменьшается, снижаясь до величины порядка 200 эВ, а сама функция распределения значительно сужается (кривая 2). При отрицательных токах на коллектор наиболее вероятная энергия ионов остается практически неизменной на фоне возрастания тока ионов на коллектор (кривая 3).

Уменьшение энергии регистрируемых ионов указывает на приближение зоны ионизации к поверхности металлгидридного катода в область меньших

падений напружений. Смещение зоны генерации тем сильнее, чем выше степень насыщенности водородом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы особенности работы источника ионов водорода пеннинговского типа с металлгидридным катодом.

Показано, что использование металлгидридного катода позволяет управлять процессами ионизации в объеме разряда. Установлено, что десорбция водорода при разложении гидридных фаз катода позволяет смещать область ионизации рабочего газа к катоду, изменять функцию распределения ионов по энергиям, извлекаемых из разряда, а также позволяет формировать компенсированные по заряду потоки ионов водорода. Установлены области параметров работы источника, при которых имеет место токовая компенсация. Показано, что влияние металлгидридного катода на эмиссионные характеристики пеннинговского ионного источника существенно зависит от степени насыщения катода водородом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Yu.F. Shmal'ko, V.V. Solovey, and M.V. Lototsky. Use of hydrides in systems for supplying vacuum physical-energy installations // *Hydrogen Energy Progress X. Proc. 10-th World Hydrogen Energy Conf.* Ed. by D.L. Block, T.N. Veziroglu. – Int. Association for Hydrogen Energy. 1994, v.2, p.1311–1319.
2. Ye.V. Klochko, M.V. Lototsky, V.V. Popov, Yu.F. Shmal'ko, V.N. Borisko. Investigation of plasma interaction with metal hydride // *Int. J. Hydrogen Energy*. 1999, v.24, p.169-174.
3. 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.
4. Ю.Ф. Шмалько, В.М. Бориско, Є.В. Клочко, М.В. Лотоцький, В.В. Соловей. Про коливальне збудження молекул водню, що десорбується із металогідридів // *Доповіди НАН України*. 2000, №11, с.91-95.
5. I.A. Afanas'eva, V.N. Borisko, Ye.V. Klochko, I.N. Sereda, A.F. Tseluyko. Current compensation of hydrogen ion beam extracted from PIG with metal-hydride cathode // *Probl. of Atomic Sci. and Tech. Series «Plasma physics» (13)*. 2007, №1, p.191-193.
6. A. Stern, A. Resnic, D. Shaltiel. Thermal desorption of spectra of hydrogen in  $HfV_2H_x$  and  $ZrV_2H_x$  // *Journal of the Less-Common Metals*. 1982, v.88, p.431-440.
7. В.А. Яртись, І.Ю. Завалій, М.В. Лотоцький, І.І. Булик, П.Б. Новосад, Ю.Ф. Шмалько. Сплави на основі Zr-V-Fe – ефективні поглиначі водню // *Фіз.-хім. механіка матеріалів (27)*. 1991, №2, с.26-35.
8. V.N. Borisko, Ye.V. Klochko, I.N. Sereda. Influence of saturation degree of metal-hydride cathode on characteristics of Penning type ion source of hydrogen // *Probl. of Atomic Sci. and Tech. Series «Plasma electronics and new acceleration methods»*. 2003, v.3, p.217-220.
9. С.Б. Валуйская и др. Исследование процесса активирования водорода металлгидридами. Масс-спектрометрическое определение потенциала и сечения ионизации водорода // *ВАНТ. Сер. «Атомно-водородная энергетика и технология»*. 1989, в.1, с.58-61.

Статья поступила в редакцию 08.05.2008 г.

## PECULIARITIES OF METAL-HYDRIDE CATHODE APPLYING IN PIG ION SOURCE

*I.N. Sereda, Ye.V. Klochko, A.F. Tseluyko*

The results of experimental investigations of metal-hydride cathode influence on emission characteristics of PIG ion source of hydrogen have been presented. The processes of current compensation of extracted ions from such a source were studied. The energy distribution function of extracted along the magnetic field ions depending on mode of source work were carried out.

## ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛОГІДРИДНОГО КАТОДУ В ПЕНІНГОВСЬКОМУ ІОНОМУ ДЖЕРЕЛІ

*I.M. Sereda, Є.В. Клочко, О.Ф. Целуйко*

Представлено результати експериментальних досліджень впливу металогідридного катода на емісійні характеристики джерела іонів водню пенінговського типу. Вивчено процеси струмової компенсації іонів, що витягаються з такого джерела. Досліджено функції розподілу іонів по енергіях, що виходять уздовж магнітного поля, залежно від зовнішніх параметрів роботи джерела.