

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛОГИДРИДНОГО КАТОДА НА ВЫХОД ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ РАЗРЯДА ПЕННИНГА

И.Н. Середя¹, А.Ф. Целуйко¹, Д.В. Рябчиков¹, Е.В. Клочко²

¹*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, Украина;*

²*Южноафриканский институт современной химии материалов, Кейптаун, ЮАР*

E-mail: igorsereda@mail.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований разряда Пеннинга с металлгидридным катодом в режиме эмиссии электронов через отверстие в центре медного катода-отражателя. Изучены частотные характеристики ВЧ-колебаний в разрядной ячейке и в электронном пучке. Исследованы параметры плазмы на оси разряда вблизи металлгидридного катода и катода-отражателя, а также энергетические спектры электронов, покидающих разряд в продольном направлении.

1. ВВЕДЕНИЕ

В источниках заряженных частиц, использующих водород в качестве рабочего газа, перспективным является применение твердотельных генераторов водорода на основе металлгидридов системы Zr-V в качестве материала катодов разряда. Основными преимуществами данных систем являются высокая плотность упаковки водорода в металлической матрице, возможность длительного его хранения и осуществления локального напуска водорода в широком диапазоне давлений.

Под действием ионной бомбардировки с поверхности катода помимо эмиссии заряженных частиц происходит десорбция водорода. При этом поток десорбируемого водорода может значительно превышать поток распыленных атомов материала катода, что существенным образом повлияет на характеристики и свойства газового разряда. Так, в работах [1, 2] в разряде Пеннинга был обнаружен интенсивный выход электронов через отверстие в центре металлгидридного катода, тогда как в классическом варианте поток электронов отсутствует.

Существующая совокупность экспериментальных данных не позволяет идентифицировать физические процессы, ответственные за данное явление. В настоящей работе проведены дополнительные исследования влияния металлгидридного катода на выход электронов из разряда Пеннинга в аксиальном направлении.

2. ОБОРУДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования проводились в разряде с симметричной пеннинговской конфигурацией электродов (Рис.1). Протяженность разрядного промежутка составляла 5 см. Все электроды были расположены внутри кварцевого цилиндра, помещенного в продольное магнитное поле напряженностью 0,5...1 кЭ. Цилиндрический анод 1 из нержавеющей стали имел внутренний диаметр 3,7 см и длину 3 см. Металлгидридный катод 2 представлял собой диск диаметром 2 см и толщиной 0,5 см, который был спрессован из смеси порошков насыщенного водородом гидридообразующего сплава $Zr_{50}V_{50}H_x$ и медного наполнителя. Весовое содержание медного наполнителя составляло 30%. Насы-

щенность катода водородом составляла 900 см^3 при нормальных давлении и температуре. Катод-отражатель 3 был выполнен из меди и имел те же размеры, что и металлгидридный катод 2. Расстояние между анодом и катодами составляло 1 см. Оба катода находились под потенциалом земли, а на анод подавалось положительное напряжение. В контрольных экспериментах использовались два одинаковых медных катода.

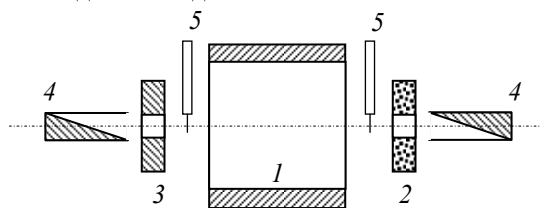


Рис.1. Схема разрядной ячейки

В центре катодов имелись отверстия диаметром 0,5 см, за которыми устанавливались цилиндры Фарадея 4 для измерения тока выходящих заряженных частиц. При изучении энергетических спектров цилиндры Фарадея заменялись на многосеточные энергоанализаторы.

Исследование ВЧ-составляющей сигнала с цилиндров Фарадея и анода проводилось анализатором спектра. Параметры плазмы на оси разрядной ячейки измерялись зондами Ленгмюра 5, расположенными на половине расстояния анод-катод.

Остаточное давление в вакуумной камере не превышало $3 \cdot 10^{-6}$ Торр. Для установления рабочей точки по давлению использовался баллонный водород. После зажигания разряда давление повышалось за счет десорбции водорода из металлгидрида. При стабильном горении разряда доля десорбированного водорода составляла 30%. Исследования проводились при давлении $10^{-5} \dots 10^{-4}$ Торр.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения зондовых измерений параметров плазмы в разрядной ячейке в данной работе были увеличены размеры электродов по сравнению с [1, 2]. Сразу следует отметить, что это привело к смене преимущественного направления выхода электронов из разряда. Если ранее наблюдался основной выход электронов со стороны металлгид-

ридного катода, то при увеличении размеров – со стороны медного катода. В связи с этим изучались не только распределения параметров плазмы в разрядной ячейке, но и ВЧ-характеристики системы. Последнее особенно важно для понимания механизма появления продольного выброса электронов.

Из вольт-амперных характеристик разряда (Рис.2, а) и кривых для токов на коллекторы (Рис.2, б) видно, что с увеличением анодного напряжения разряд Пеннинга с металлгидридным катодом последовательно проходит три стадии.

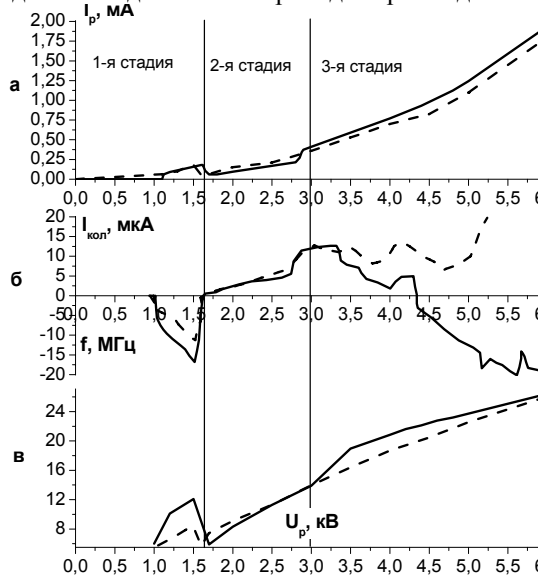


Рис.2. Зависимости разрядного тока (а), токов заряженных частиц, выходящих через отверстия в катодах (б), частоты колебаний (в) от падения напряжения на разряде Пеннинга с металлгидридным катодом (сплошные кривые) и в контрольном эксперименте (пунктирные кривые) при $P=3 \cdot 10^{-5}$ Торр, $H=1$ кЭ

В первой стадии при $U_p \approx 1 \dots 1,7$ кВ выход электронов наблюдается с обоих торцов разрядной ячейки вне зависимости от материала электродов. В ранних работах [3, 4] это объяснялось образованием большого отрицательного объемного заряда вблизи анода, который уменьшал потенциал центра ниже катодного падения напряжения. Коллективные процессы при этом не учитывались. Позднее, в работе [5], выброс электронов связывался с образованием в анодном слое электронов с аномально большой энергией, способных преодолеть потенциальный барьер возле катода.

Дальнейшее увеличение U_p приводит к скачкообразной смене знака тока на коллекторы, что сопровождается уменьшением более чем в два раза разрядного тока. Разряд переходит во вторую стадию с генерацией ионов в аксиальном направлении.

Третья стадия наблюдается в случае использования металлгидридного катода. В этой стадии при напряжении на аноде $U_p \approx 2,75 \dots 3$ кВ снова происходит увеличение разрядного тока и возврат к режиму с выбросом электронов в продольном направлении. В отличие от перехода между первой и второй стадиями здесь процесс происходит более плавно, в основном благодаря компенсирующему дей-

ствию ионов, которые также продолжают выходить через отверстия в катодах. При этом ток электронов регистрируется только со стороны медного катода (см. Рис.2, б, сплошная кривая), тогда как на коллектор со стороны металлгидридного катода продолжает идти положительный ток (см. Рис.2, б, пунктирная кривая).

Наличие всех трех стадий наблюдалось в диапазоне давлений $10^{-5} \dots 10^{-4}$ Торр. С увеличением давления или величины магнитного поля напряжение перехода во вторую стадию падало, а напряжение перехода в третью стадию росло.

При малых U_p десорбция водорода из металлгидрида невелика, поэтому существование первых двух стадий горения разряда не зависит от материала катодов, что наблюдалось ранее рядом авторов [4-6]. Повышение вводимой в разряд мощности за счет роста U_p ведет к интенсификации выделения водорода из металлгидрида, что увеличивает его поток в область разряда. Взаимодействие дополнительного потока нейтрального газа с заряженными частицами существенно меняет характеристики плазмы, что ведет к переходу разряда в третью стадию. Первые две стадии горения разряда достаточно хорошо изучены [1-5], поэтому основное внимание в данной работе было уделено третьей стадии разряда.

Исследование ВЧ-составляющей напряжения разряда и аксиальных токов выходящих заряженных частиц позволило выделить ряд характерных особенностей. Во-первых, модуляция тока электронов, покидающих разряд через центральные отверстия в медном катоде, происходила с той же частотой, что и колебания разрядного напряжения. Во-вторых, в контрольных экспериментах с двумя медными катодами, когда наблюдался только ионный аксиальный ток, зависимость частоты ВЧ-колебаний от разрядного напряжения была близка к линейной (см. Рис.2, в, пунктирная кривая). В-третьих, для случая металлгидридного катода переход из одной стадии в другую сопровождался резким изменением частоты ВЧ-колебаний на величину порядка 6 МГц (см. Рис.2, в, сплошная линия). Частота уменьшалась при переходе из первой стадии во вторую и увеличивалась при переходе из второй в третью. Аксиальному выбросу электронов из разряда Пеннинга соответствовали повышенные частоты ВЧ-колебаний.

Резкое изменение частоты колебаний носило пороговый характер не только при изменении U_p , а также величины внешнего магнитного поля H . Это продемонстрировано на Рис.3, где представлены зависимости частоты колебаний от магнитного поля. Видно, что в контрольном эксперименте с двумя медными катодами частота основной гармоники спадает линейно с увеличением магнитного поля (кривая 2). Перехода в третью стадию здесь не происходит. В случае применения металлгидридного катода эта зависимость нелинейна, что говорит о существенном изменении радиальной составляющей электрического поля в разряде. При $H = 750$ Э частота основной гармоники уменьшается, и в разряде возбуждаются дополнительные гармоники на частотах порядка 20 МГц (кривая 3) и 8 МГц (кривая 4), которые линейно падают с ростом магнитного поля

до 850 Э, после чего эти гармоники исчезают. При $H \approx 920$ Э частота основной гармоники скачкообразно увеличивается (кривая 1). Разряд переходит в третью стадию. В контрольных экспериментах с двумя медными катодами также наблюдалось появление дополнительной гармоники, но только на частоте, близкой к 8 МГц и при $H \geq 850$ Э (кривая 5).

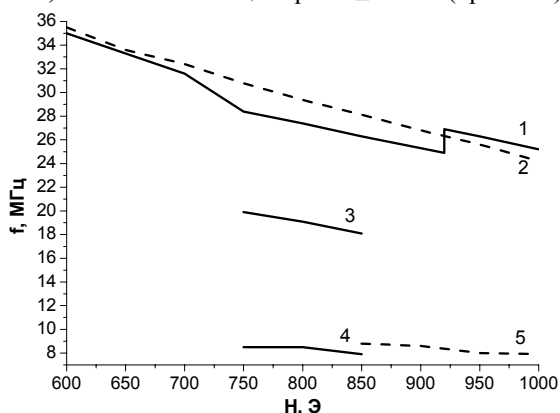


Рис.3. Зависимости частоты и амплитуды колебаний от внешнего магнитного поля в случае применения металлогидридного катода (сплошные кривые) и двух медных катодов (пунктирные кривые) в разряде Пеннинга при $P=3 \cdot 10^{-5}$ Торр, $U_p=6$ кВ

Можно сделать следующий вывод относительно появления электронного тока на коллектор и повышения частоты ВЧ-колебаний в разряде. Модуляция электронного тока связана с импульсным выбросом сгустков электронов из разряда. Поэтому, увеличение частоты ВЧ-колебаний в первой стадии и при переходе разряда в третью стадию ведет к повышению количества выбрасываемых электронов. Поскольку величина тока на коллекторы определяется разностью между ионным и электронным током, то повышение частоты выброса электронных сгустков из разряда приводит к преобладанию электронного тока в выходящем потоке заряженных частиц и смене его знака на коллектор.

Причину выхода электронов только со стороны медного катода демонстрирует Рис.4. На нем приведены зависимости плавающих потенциалов на оси разряда возле медного и металлогидридного катодов от U_p .

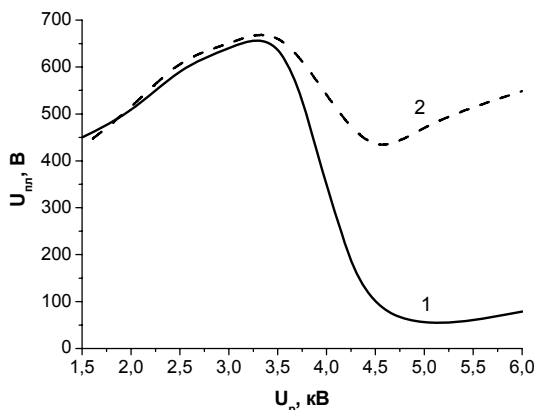


Рис.4. Зависимости плавающего потенциала на оси разряда Пеннинга возле медного (1) и металлогидридного (2) катодов от анодного напряжения при $P=3 \cdot 10^{-5}$ Торр, $H=1$ кЭ

Видно, что при переходе разряда в третью стадию на оси разряда наблюдается существенное уменьшение плавающего потенциала у обоих катодов. Однако, со стороны медного катода потенциал падает до значений порядка 50 В (кривая 1), а возле металлогидридного – только до 450 В (кривая 2).

Анализ энергетических спектров для электронов, выходящих через центральное отверстие в медном катоде, показал, что максимум функции распределения находится в пределах 100...150 эВ, а основное количество электронов имеет энергию 50...250 эВ. (На Рис.5 приведена типичная функция распределения). При этом с ростом U_p максимум функции распределения смещается в сторону больших энергий.

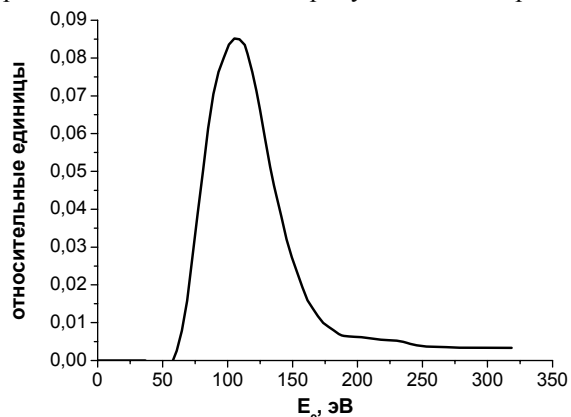


Рис.5. Функция распределения по энергиям электронов, выходящих через отверстие в медном катоде, при $P=3 \cdot 10^{-5}$ Торр, $U_p=5$ кВ

Таким образом, электроны, имеющие энергии больше 50 эВ, преодолевают потенциальный барьер возле медного катода и выходят через его центральное отверстие. Со стороны же металлогидридного катода могут выходить только высокоэнергетичные электроны, количество которых очень мало.

Появление градиента потенциала вдоль оси системы, по-видимому, связано с влиянием десорбции водорода с поверхности металлогидридного катода на параметры плазмы. Исследования параметров плазмы на оси разряда показали значительное увеличение плотности плазмы в случае применения металлогидридного катода (Рис.6, кривые 1 и 2) по сравнению с контрольным экспериментом с двумя медными катодами (Рис.6, кривая 3).

Следует учесть, что при малых значениях разрядного тока выход водорода из металлогидрида происходит, по-видимому, в основном за счет ионно-стимулированной десорбции, скорость выделения водорода при этом сравнительно небольшая и только возле поверхности металлогидрида образуется область с повышенной концентрацией плазмы (кривая 1). Увеличение разрядного тока ведет к разогреву металлогидрида, и основную роль в десорбции начинает играть тепловое разложение гидридных фаз. Скорость десорбции существенно возрастает и профиль плотности вдоль оси выравнивается. При этом температуры электронов вблизи медного и металлогидридного катодов отличались. Возле металлогидридного катода температура электронов в начале третьей стадии была на уровне 30 эВ и прак-

тически не менялась с ростом U_p , а возле медного – изменялась от 50 до 60 эВ при увеличении U_p .

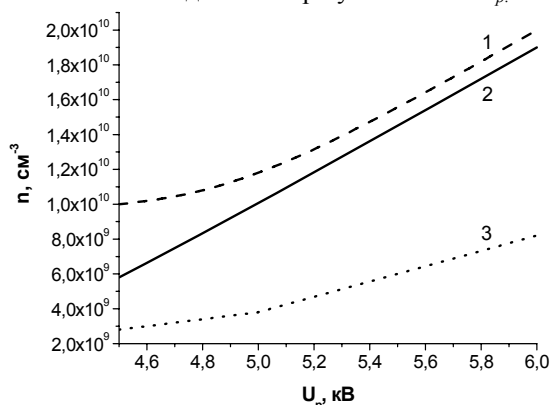


Рис. 6. Зависимость плотности плазмы на оси разряда возле металлогидридного катода (1), возле медного катода (2) и в случае двух медных катодов (3) от напряжения разряда при $P=3 \cdot 10^{-5}$ Торр, $H=1$ кЭ

Таким образом, наличие металлогидридного катода, который является локальным источником нейтрального водорода, существенно влияет на распределение параметров плазмы в ячейке, продольное распределение потенциала и ведет к выбросу электронов вдоль оси разряда. Это следует учитывать при разработке источников заряженных частиц с

твердотельными генераторами водорода в качестве материала катодов разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. I.A. Afanas'eva V.N. Borisko, Ye.V. Klochko, A.F. Tseluyko. Current compensation of hydrogen ion beam extracted from PIG with metal-hydride cathode // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Physics"*. 2007, №1, p.191-193.
2. Е.В. Клочко, И.Н. Серeda А.Ф. Целуйко. Особенности применения металлогидридного катода в пеннинговском ионном источнике // *Вопросы атомной науки и техники. Серия "Плазменная электроника и новые методы ускорения"*. 2008, №4, с.155-158.
3. Ю.Е. Крендель, А.С. Ионов // *ЖТФ*. 1964, т.34, №7, с.1199.
4. Г.В. Смирницкая, Р.П. Баберцян. О потоках заряженных частиц к катоду в разряде типа Пеннинга // *Радиотехника и электроника*. 1966, с.1897-1899.
5. В.Н. Бориско, А.А. Петрушеня. Особенности генерации низкоэнергетичных электронных пучков большого сечения из плазменного источника электронов пеннинговского типа // *ЖТФ*. 2003, т.1, №73, с.86-90.

Статья поступила в редакцию 01.06.2010 г.

INFLUENCE OF METAL-HYDRIDE CATHODE ON ELECTRONS YIELD FROM PIG

I.N. Sereda, A.F. Tseluyko, D.V. Ryabchikov, Ye.V. Klochko

The results of experimental investigations of PIG with metal-hydride cathode in electron emission mode through the hole in the centre of copper cathode-reflector are given. The frequency characteristics of HF oscillation in the discharge gap and in the electron beam are studied. The plasma parameters on the discharge axis close to metal-hydride cathode and cathode-reflector are investigated as well as energy spectra of leaving electrons in longitudinal direction.

ВПЛИВ МЕТАЛОГІДРИДНОГО КАТОДУ НА ВИХІД ЕЛЕКТРОНІВ З РОЗРЯДУ ПЕНІНГА

I.M. Sereda, O.F. Tseluyko, D.V. Ryabchikov, E.V. Klochko

Наведено результати експериментальних досліджень розряду Пенінга з металогідридним катодом у режимі емісії електронів через отвір у центрі мідного катоду-відбивача. Вивчено частотні характеристики ВЧ-коливань у розрядній комірці й в електронному пучку. Досліджено параметри плазми на осі розряду поблизу металогідридного катода та катоду-відбивача, а також енергетичні спектри електронів, що залишають розряд у поздовжньому напрямку.