

## ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В ПРОТЯЖЕННОМ ПЛАЗМЕННОМ ДИОДЕ С МЕТАЛЛОГИДРИДНЫМ ИНЖЕКТОРОМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

**А.Ф. Целуйко, В.Н. Бориско, Д.В. Зиновьев, А.А. Дробышевская\*, Е.В. Ключко**

*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина*

*\*Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины, (Харьков)*

*Украина*

Поступила в редакцию 17.11.2003

В статье рассматривается возможность создания автономного сильноточного источника электронного пучка на основе импульсного самостоятельного плазменно-пучкового разряда М-типа. Для создания предварительной плазмы используется отражательный разряд с полым металлгидридным катодом, который обеспечивает импульсную подачу водорода в газоразрядную камеру. В качестве материала металлгидридного катода использовался геттерный гидридообразующий сплав  $Zr_{50}V_{50}$ . Приведены результаты исследований термодесорбционных свойств такого металлгидридного катода, оптимизированы параметры дополнительного источника заряженных частиц и условий формирования интенсивных электронных пучков в самостоятельном плазменно-пучковом разряде.

### ВВЕДЕНИЕ

Протяженные сильноточные импульсные плазменные диоды низкого давления применяются для генерации интенсивных пучков электронов и ионов с токами  $1 \div 10^5$  А и энергией  $10^2 \div 10^6$  эВ [1]. Их использование основано на эффекте образования в токнесущей плазме диодного промежутка двойного электрического слоя объемного заряда, на котором сосредотачивается практически все приложенное к диоду напряжение [2]. В электрическом поле такого двойного слоя происходит встречное ускорение электронных и ионных пучков, токи которых определяются не геометрией разрядного промежутка, а параметрами плазмы, поскольку толщина двойного слоя, как правило, много меньше длины диодного промежутка. При этом имеет место соотношение Ленгмюра:  $j_e/j_i = \sqrt{M_i/m_e}$ , где  $j_e$  и  $j_i$  – плотности тока соответственно электронного и ионного пучков, а  $M_i$  и  $m_e$  – масса иона и электрона [3]. Продолжительность формирования пучков заряженных частиц зависит от длительности существования двойного слоя и находится в пределах от долей микросекунды до сотен и тысяч микросекунд.

Возникновение двойного слоя и генерация пучков заряженных частиц в сильноточном плазменном диоде обусловлены возбуждением в диоде самостоятельного плазменно-пучкового разряда (СППР), который является следующей за дуговым разрядом формой самостоятельного разряда в газе. Впервые СППР был описан в работе Луценко Е.И. [4]. Для СППР свойственны эмиссия электронов с катода катодными пятнами, перенос разрядного тока пучками заря-

женных частиц и высокочастотный нагрев электронов плазмы за счет коллективного пучково-плазменного взаимодействия. Переход от дугового разряда к СППР происходит в условиях, когда токнесущая плазма диодного промежутка не в состоянии перенести весь ток, который обеспечивает источник питания [5].

Различают два характерных типа СППР: К-разряд и М-разряд, которые отличаются как пространственной локализацией двойного слоя, так и условиями возникновения и динамикой поддержания [6]. При К-разряде двойной слой локализован в прикатодной области диода на фронте плотной плазмы катодных пятен, и мощный электронный пучок пронизывает весь разрядный промежуток [7]. В случае М-разряда (в разрядных трубках постоянного сечения) локализация двойного слоя по длине диодного промежутка определяется областью с минимумом концентрации плазмы. При этом основной ток разряда переносится пучком электронов только на участке двойной слой – анод. Меняя область минимума концентрации плазмы, можно управлять местоположением слоя, а, следовательно, и местоположением зоны генерации интенсивных пучков заряженных частиц. Дополнительным способом управления местоположением двойного слоя является сужение разрядной трубки с анодной стороны, что локализует двойной слой в области перед сужением [8].

Большой интерес использование СППР вызывает при создании генераторов интенсивного рентгеновского излучения [9]. В этом случае более предпочтительной является локализация двойного слоя непосредственно у поверхности

анода-мишени, что исключает потери энергии электронного пучка на взаимодействие с плазмой [10]. При этом создание градиента концентрации плазмы с минимумом у анода в сильноточных импульсных плазменных диодах возможно как за счет градиента концентрации первичной плазмы, которой предварительно заполняется диодный промежуток, так и за счет градиента давления нейтрального газа вдоль разрядной трубки.

Следует отметить, что формирование постоянного градиента давления предполагает, как правило, наличие мощных средств откачки, что в различных практических приложениях зачастую затруднено. Для автономных систем необходимы очень быстрый импульсный напуск рабочего газа с катодной стороны плазменного диода (чтобы кратковременно создать необходимый градиент давления) и геттерная откачка отработанного газа после гашения разряда. В качестве рабочего газа мощных автономных систем хорошо подходит водород, который допускает относительно простую его подачу из насыщенного металлгибрида и последующую утилизацию ненасыщенными геттерными обратимыми сорбентами водорода. В этом случае возможна рекуперация водорода путем его возврата из утилизирующих элементов в подающие во время регламентного восстановительного периода без разгерметизации системы.

В последнее время в системах газового питания находят широкое применение твердотельные генераторы водорода на базе бинарных гидридов таких металлов, как Ti, Zr, Sc, Er, U и др. [11]. Достоинством твердотельных генераторов водорода являются, прежде всего, высокая чистота напускаемого водорода ( $99,99 \div 99,999\%$ ), безопасность и компактность его хранения. Разработанные в Италии компанией "SAES Getters" интерметаллические соединения типа ST-707 и ST-172 на основе Zr-V, Zr-V-Fe [12], обратимо поглощающие водород, позволяют создавать универсальные системы газового обеспечения, совмещающие в себе функции не только генератора рабочего газа, но и геттера. Такие интерметаллические соединения при комнатной температуре обладают равновесными давлениями, не превышающими  $1 \div 10$  Па, при улучшенной динамике сорбции – десорбции и водородоемкости. Разложение гидридных фаз этих материалов позволяет обеспечивать напуск изотопов водорода в интервале рабочих температур  $400 \div 900$  К, а само выделение газа протекает равномерно.

Дополнительной особенностью таких соединений является снижение потенциала ионизации генерируемого водорода на  $0,3 \div 0,5$  эВ, которое

обусловлено рекомбинацией атомов водорода на поверхности металлгибрида и последующей десорбцией молекул в возбужденном термодинамически неравновесном состоянии [13].

В настоящей работе рассматривается возможность создания автономного сильноточного источника пучка электронов с энергией до 20 кэВ и током до 5 кА на основе сильноточного импульсного плазменного диода низкого давления с протяженным межэлектродным промежутком и импульсной подачей водорода. Особенностью устройства является использование для предварительного заполнения плазмой разрядного промежутка оригинального импульсного дополнительного источника заряженных частиц на основе ячейки Пеннинга с металлгидридным полым катодом, который кроме первичной плазмы с необходимым градиентом концентрации создает также и градиент давления водорода в разрядной трубке.

Выбор типа дополнительного источника заряженных частиц был не случаен. Кроме него рассматривались хорошо известные источники, основанные на поверхностном пробое диэлектрика [14], и источники с электронной пушкой [15].

Формирование первичной плазмы за счет поверхностного пробоя диэлектрика является простейшим способом с технической точки зрения. В результате эрозии диэлектрика в момент разряда получается плотная плазма, которая диффундирует в вакуум. Этот способ нашел широкое применение в различных импульсных устройствах. Однако для создания автономных систем он не подходит из-за недостаточно хорошей повторяемости параметров плазмы от импульса к импульсу, быстрого износа рабочей поверхности диэлектрика, интенсивного запыления изоляторов и наличия тяжелых примесных ионов в плазме.

Более стабильные параметры плазмы достигаются в пучково-плазменном разряде с внешней инжекцией электронного пучка. Использование внешней электронной пушки с энергией в несколько кэВ и током до 10 А позволяет получать распределение плотности плазмы, соответствующее распределению концентрации нейтральных частиц при практически 100 % ионизации. Однако транспортировка интенсивного электронного пучка вдоль разрядной трубки предусматривает наличие ведущего магнитного поля напряженностью до 1 кЭ [16], что существенно усложняет конструкцию. Кроме того, для электронной пушки с термокатодом требуется охлаждение электродов.

Перечисленные недостатки отсутствуют в источнике синтезированных электрон-ионных пуч-

ков [17], который позволяет создавать первичную плазму с необходимыми параметрами. Такой источник и был выбран в качестве прототипа для дополнительного источника заряженных частиц.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема устройства приведена на рис.1. Основными элементами являются: катодный блок КБ с дополнительным источником заряженных частиц, анодный блок АБ, разрядная вакуумная трубка РТ и система электропитания.

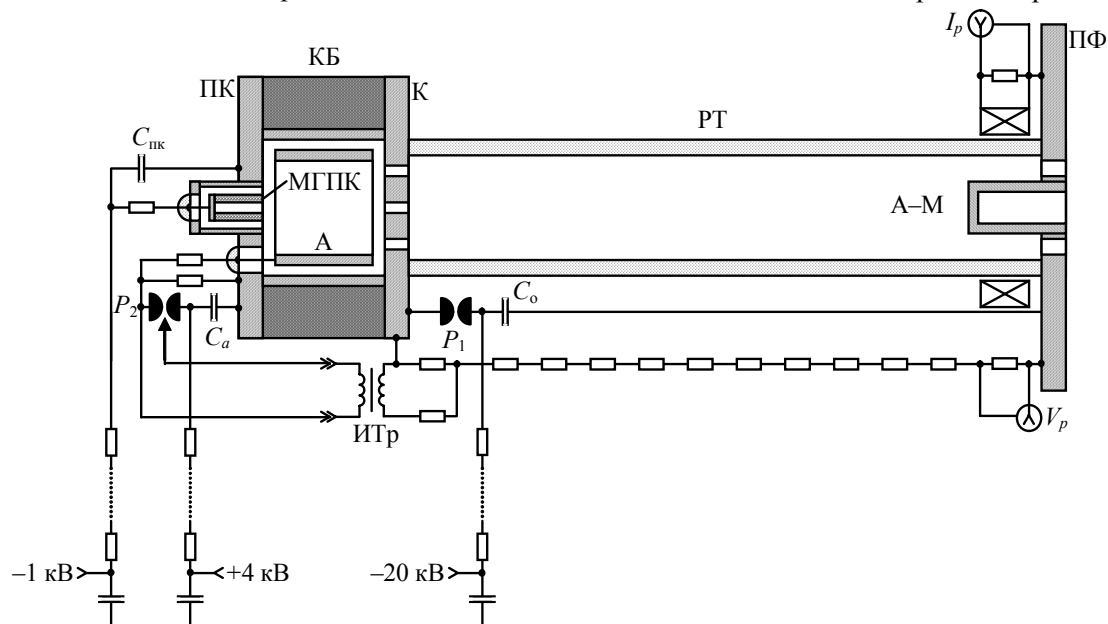


Рис. 1. Схема устройства на основе сильноточного импульсного плазменного диода низкого давления с протяженным межэлектродным промежутком.

Дополнительный источник заряженных частиц состоит из двух дисковых катодов К и ПК диаметром 130 мм и толщиной 10 мм, аксиально с которыми расположен цилиндрический анод А длиной 30 мм и внутренним диаметром 33 мм. Продольное магнитное поле в источнике создается кольцевыми постоянными магнитами, расположенными между дисковыми катодами снаружи анода (дисковые катоды выполнены из магнитомягкого металла). Герметизация источника обеспечивается немагнитной металлической трубчатой вставкой длиной 40 мм с внутренним диаметром 39 мм, которая коаксиально с анодом располагается между дисковыми катодами. В центре катода ПК расположен гальванически изолированный металлгидридный полый катод МГПК, помещенный в медную трубку с внутренним диаметром 14 мм и длиной 50 мм. Металлогидридный полый катод длиной 20 мм представляет собой набор из 4 таблеток. Внешний диаметр каждой таблетки 10 мм, а толщина – 5 мм. В центре каждой таблетки сделано отверстие диаметром 4 мм. В качестве исходного

материала таблеток использовался гидридообразующий геттерный сплав состава  $Zr_{50}V_{50}$ , приготовленный методом электроннолучевой плавки. Таблетки для полого катода спрессовывали из смеси порошков насыщенного водородом геттерного гидридообразующего сплава и медного наполнителя. Содержание медного наполнителя составляло 40% от массы навески гидроксида.

Критерием выбора сплава для полого катода являлась возможность его работы в режимах как

десорбции, так и сорбции водорода в вакуумных условиях (для реализации в дальнейшем процесса рекуперации водорода). Дополнительными требованиями были низкое равновесное давление водорода при комнатной температуре, поскольку в плазменном диоде и дополнительном источнике заряженных частиц в перерывах между импульсами должно поддерживаться давление не выше  $10^{-1}$  Па, и относительно невысокая температура разложения гидридных фаз. Выбранный материал полого катода позволяет обеспечивать десорбцию изотопов водорода в интервале рабочих температур  $400 \div 900$  К, а сама генерация газа протекает равномерно.

Для выхода плазмы из дополнительного источника в область разрядной трубки в дисковом катоде К имеется 7 отверстий диаметром 4 мм. Одно отверстие расположено по центру, а остальные – на диаметре 28 мм.

Дополнительный источник заряженных частиц мог работать в условиях внутреннего и внешнего напуска водорода. Внутренний напуск водорода осуществлялся за счет его десорбции из металло-

гидридного полого катода (МГПК). Внешний напуск водорода осуществлялся через систему гашения паразитного разряда и медный полый катод, который по форме и размерам совпадал с металлогидридным полым катодом.

Анодный блок АБ состоит из пристыковочного фланца, в центре которого располагается медный цилиндрический анод-мишень А-М длиной 50 мм и диаметром 30 мм. Для обеспечения откачки в пристыковочном фланце по периферии анода-мишени сделаны 12 отверстий диаметром 10 мм. Для измерения разрядного тока в анодном блоке был смонтирован широкополосный пояс Роговского с чувствительностью 250 А/В. В настоящей работе геттерная откачка водорода не применялась, а восстановление стартового давления после срабатывания устройства производилось посредством высоковакуумного откачного поста.

Сильноточный разряд возбуждался импульсным напряжением до 20 кВ между катодом К и анодом-мишенью А-М в стеклянной разрядной трубке РТ после заполнения ее предварительной плазмой. Длина разрядной трубки – 450 мм, внутренний диаметр – 56 мм. Внутри разрядной трубки могла размещаться сменная диверторная вставка, выполненная из стеклянной тонкостенной трубки длиной 350 мм с внутренним диаметром 36 мм. Тонкостенная трубка была расположена коаксиально с разрядной трубкой и закреплялась с помощью центрирующих диэлектрических колец.

Система электропитания состоит из системы питания импульсного плазменного диода и системы питания дополнительного источника заряженных частиц. В систему питания импульсного плазменного диода входят импульсный конденсатор  $C_0$  емкостью 1 мкФ и воздушный неуправляемый разрядник  $P_1$ . Индуктивность разрядной цепи плазменного диода не превышала 1 мкГн. Измерение напряжения на плазменном диоде осуществлялось с помощью малоиндуктивного резистивного делителя напряжения общим сопротивлением 5 кОм с коэффициентом деления 1:1000.

Работа дополнительного источника заряженных частиц обеспечивалась подачей потенциала +4 кВ на анод А ячейки Пеннинга и –1 кВ на металлогидридный полый катод относительно потенциала катодов К и ПК. Положительный потенциал на анод подавался через балластный резистор 5 кОм и управляемый вакуумный разрядник  $P_2$  с высоковольтного конденсатора  $C_a$  емкостью 1 мкФ. Отрицательный потенциал на металлогидридный полый катод подавался через

балластный резистор 100 Ом с конденсатора  $C_{пк}$  емкостью 1 мкФ. Заряд конденсаторов  $C_a$  и  $C_{пк}$  осуществлялся через зарядные резисторы от блоков постоянного напряжения +4 кВ и –1 кВ соответственно.

Для исключения срабатывания дополнительного источника заряженных частиц во время заряда конденсатора  $C_0$  напряжение на анод ячейки Пеннинга подавалось только в момент импульса напряжения на плазменном диоде. Это достигалось путем запуска управляемого разрядника  $P_2$  через импульсный трансформатор ИТр сигналом от резистивного малоиндуктивного делителя напряжения. Поскольку напряжение на делителе появляется лишь в момент разряда конденсатора  $C_0$  при срабатывании разрядника  $P_1$ , то такое включение позволяет автоматически синхронизировать работу дополнительного источника заряженных частиц и плазменного диода.

Локализация двойного слоя по длине диодного промежутка контролировалась в процессе динамики разряда четырьмя внешними емкостными зондами, которые отслеживали величину потенциала плазмы в месте расположения зонда. Концентрация плазмы оценивалась методом отсечки СВЧ сигнала на длинах волн 3 см и 8 мм, что соответствует плотностям плазмы  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> и  $10^{13}$  см<sup>-3</sup> соответственно. Изучение функций распределения по энергиям электронных и ионных пучков производилось с помощью энергоанализатора Юза-Рожанского.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проверки работоспособности устройства были проведены предварительные экспериментальные исследования, направленные на отладку работы дополнительного источника заряженных частиц, определения особенностей работы металлогидридного полого катода и его влияния на характеристики дополнительного источника заряженных частиц, стабилизацию двойного слоя у поверхности анода-мишени, а также на оптимизацию размеров диверторной вставки для обеспечения продолжительного существования СППР. Для более полного понимания процессов, происходящих в исследуемом устройстве, параллельно проводились исследования физико-химических свойств самого материала металлогидридного катода.

*А. Результаты исследования свойств материала металлогидридного катода.* Выбранное интерметаллическое гидридообразующее соединение имело фазовый состав  $\alpha$ -Zr ( $a = 3,23 \text{ \AA}$ ,  $c = 5,16 \text{ \AA}$ ) и  $\lambda_2$ -ZrV<sub>2</sub> ( $a = 7,45 \text{ \AA}$ ), который оп-

ределялся методом рентгенофазового анализа. Насыщение водородом и измерение сорбционной емкости гидридообразующего сплава проводилось по методике Сиверта [11]. Максимальная насыщенность соответствовала стехиометрическому составу гидрида ( $ZrH_2 + ZrV_2H_x$ ), где  $x = 3,34 \div 4,12$  при атомном соотношении *водород/металл* =  $1,34 \div 1,50$ . Динамика разложения данного металлгидрида исследовалась методом термодесорбционной спектроскопии [12].

На рис. 2 приведены спектры термодесорбции водорода из гидрированного образца сплава

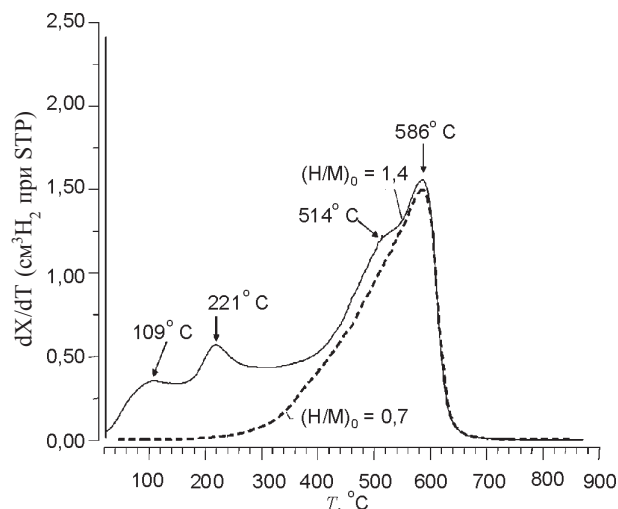
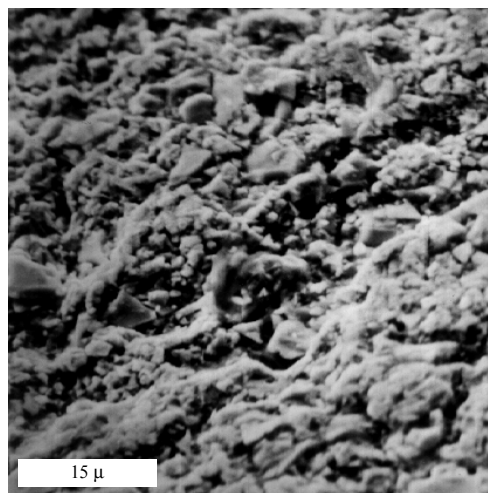
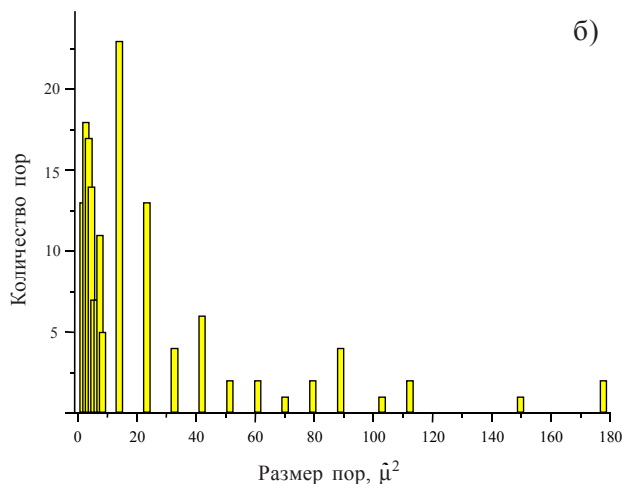


Рис. 2. Спектры термодесорбции водорода из образцов  $ZrV_2H_x$  с различными начальными концентрациями водорода.

при различных степенях его насыщения. Низкотемпературная часть спектра (до  $400^\circ C$ ) обусловлена разложением интерметаллического гидрида  $ZrV_2H_x$ , а высокотемпературная часть – разложением гидрида циркония. Для образца со степенью атомной насыщенности *водород/металл* =  $0,7$  (состав  $ZrH_2 + ZrV_2H_{0,6}$ ) основная



а)



б)

Рис. 3. а) Изображение поверхности металлгидридного образца. б) Распределение пор по поверхности.

часть водорода выделяется из фазы  $ZrH_2$  в температурном интервале  $400 \div 650^\circ C$ . Максимальная водородоемкость материала составила  $200 \div 230 \text{ см}^3/\text{г}$  при стандартных температуре и давлении (СТП). После прессования получался пористый образец, фотография которого и распределение пор по поверхности, полученные с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ-100У, приведены на рис. 3.

Б. *Результаты исследования параметров дополнительного источника заряженных частиц.* Исследование параметров дополнительного источника заряженных частиц проводилось в стационарном и импульсном режимах работы ячейки Пеннинга без подачи напряжения на электроды плазменного диода. В случае стационарного анодного напряжения результаты измерений регистрировались двухкоординатными самописцами типа ПДА-1. Для исключения разогрева металлгидридного катода в процессе экспериментов время получения одной вольт-амперной характеристики не превышало 3 с. При подаче импульсного анодного напряжения сигналы регистрировались двухлучевым осциллографом типа С1-74 с последующей фоторегистацией цифровой фотокамерой фирмы NIKON типа COOLPIX 995.

На рис.4 представлены разрядные характеристики дополнительного источника заряженных частиц в высоковольтном и сильноточном режимах работы при стационарном анодном напряжении. Высоковольтный режим исследовался при замене металлгидридного полого катода на его медный аналог в условиях внешнего напуска водорода. Это обусловлено интенсивным газовыделением металлгидридного полого катода, приводящим к быстрому росту давления водорода в источнике до значений, превышающих область существования высоковольтного ре-

жима. Сильноточный режим работы источника изучался при внутреннем и внешнем напуске водорода. В случае внутреннего напуска использовался металлгидридный полый катод, а при внешнем напуске – его медный аналог. В сильноточном режиме в обоих случаях газонапуска для одинаковых давлений отмечалось совпадение разрядных характеристик источника.

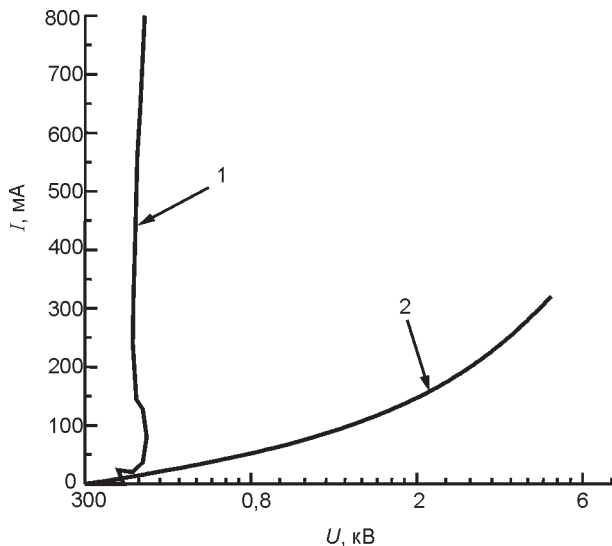


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика ячейки Пеннинга в высоковольтном (2) режиме и сильноточном (1) режиме с полым катодом.

Из рисунка видно, что в сильноточном режиме ток разряда более, чем на 2 ÷ 3 порядка превышает ток разряда в высоковольтном режиме, достигая значений 0,8 А. Это обусловлено возбуждением режима полого катода. Анодное напряжение  $U_a$ , при котором дополнительный источник заряженных частиц переходил в сильноточный режим, находилось в пределах 0,7 ÷ 1,0 кВ и практически не зависело от напряжения смещения на полой катод  $U_{пк}$ . Анодное напряжение  $U_r$  поддержания сильноточного разряда мало изменялось с изменением разрядного тока и имело значения 0,4 ÷ 0,6 кВ. Исследования параметров синтезированных пучков дополнительного источника в сильноточном режиме проводились только при внешнем напуске водорода, поскольку продолжительная работа металлгидридного полого катода приводила к быстрому его разогреву и, как следствие, к резкому повышению давления выше рабочего.

Результаты исследования параметров пучков, формируемых дополнительным источником заряженных частиц, приведены на рис. 5. Рис. 5а иллюстрирует схематическое изображение ячейки Пеннинга с качественным продольным распределением потенциала в сильноточном режиме работы источника при напряжении смещения на полой катод  $U_{пк} = -1$  кВ. Рис. 5б дает представ-

ление о функциях распределения по энергиям ионного и электронного пучков в приосевой области. На рис. 5в приведено распределение плотности токов пучков по сечению на расстоянии 10 см от выходных отверстий источника. Следует отметить, что энергию электронного пучка можно менять независимо от энергии ионного пучка путем изменения напряжения смещения  $U_{пк}$ . При этом достигается как положительный, так и отрицательный баланс токов на коллектор. При определенном значении  $U_{пк}$  был возможен нулевой баланс токов.

При переходе к импульсному питанию анода ячейки Пеннинга было установлено, что для формирования сильноточного режима работы источника и возбуждения режима полого катода за время 20 ÷ 100 мкс в условиях внутреннего напуска водорода требуется более высокое анодное напряжение, по сравнению с внешним газонапуском. При внутреннем напуске импульсное анодное напряжение составляло  $U_a = 4 ÷ 5$  кВ, тогда как при внешнем –  $U_a = 1,0 ÷ 1,2$  кВ. Однако стартовое давление перехода в сильноточный режим горения разряда при внутреннем газонапуске снизилось более, чем на порядок с  $P_0 = 10^{-1}$  Па до  $P_0 = 3 \cdot 10^{-3}$  Па по сравнению с внешним напуском водорода. Это является неоспоримым преимуществом применения металлгидридных элементов в системах газообеспечения плазменных устройств.

*В. Результаты исследования условий формирования интенсивных электронных пучков в плазменном диоде.* Исследования по формированию интенсивных электронных пучков в плазменном диоде проводились в условиях внешнего и внутреннего напуска водорода в дополнительный источник заряженных частиц. Основное отличие заключалось в том, что в первом случае градиент давления рабочего газа существовал постоянно, а во втором – формировался на время действия импульса. Следует отметить, что пороговое давление  $P_0 = 10^{-1}$  Па в дополнительном источнике при внешнем напуске соответствовало давлению  $P = 2 \cdot 10^{-2}$  Па в разрядном промежутке плазменного диода (за счет постоянной прокачки водорода и вакуумного сопротивления выходных отверстий дополнительного источника заряженных частиц). При внутреннем напуске стартовое давление  $P_0 = 3 \cdot 10^{-3}$  Па было одинаковым как для дополнительного источника, так и для разрядного промежутка плазменного диода.

Работа источника интенсивного электронного пучка проходила по следующей схеме.

При подаче напряжения от конденсатора  $C_0$

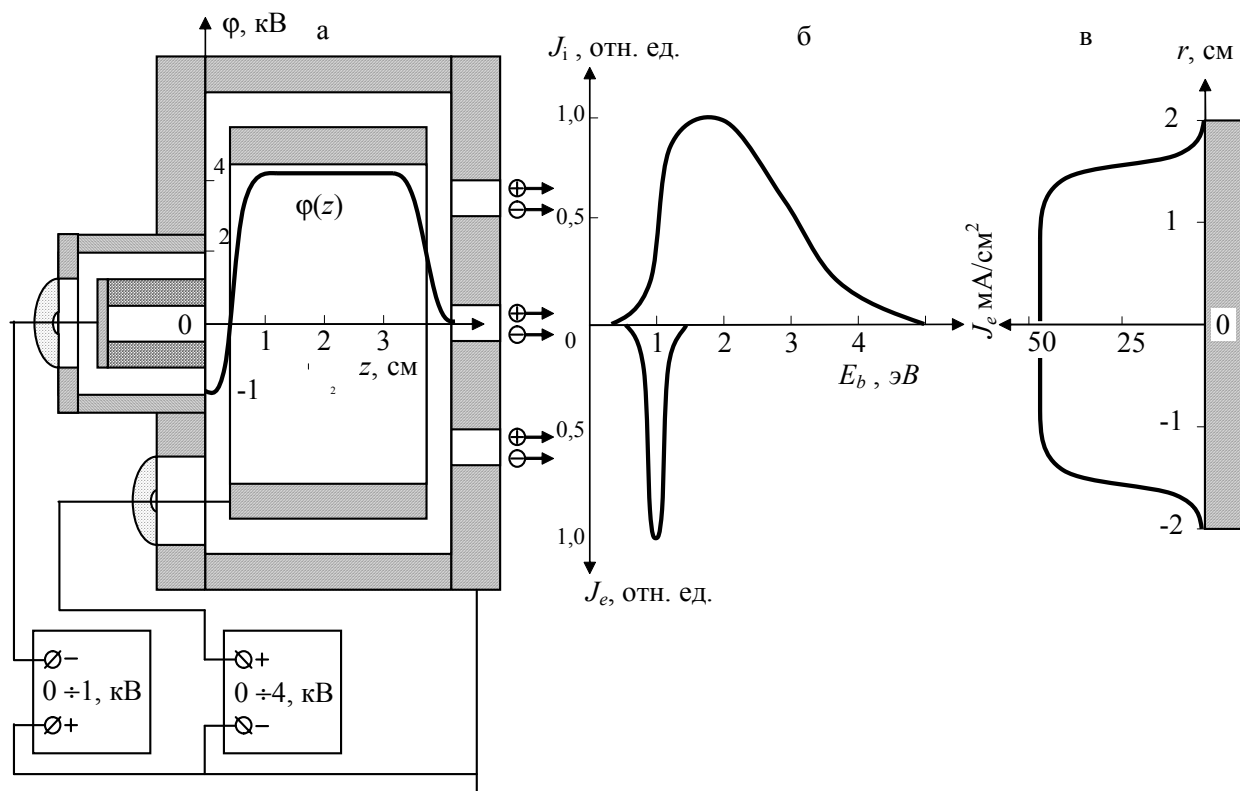


Рис. 5. а) Схема разряда Пеннинга с полым катодом. б) Функция распределения по энергиям ионного  $J_i$  и электронного  $J_e$  пучков. в) Распределение плотности тока электронного пучка по сечению.

на электроды плазменного диода срабатывает разрядник  $P_2$  и подается напряжение на анод ячейки Пеннинга. В условиях низкого давления в ячейке зажигается высоковольтный слаботочный разряд. Под действием ионной бомбардировки металлгидридного катода, с его поверхности десорбируется водород. Десорбция водорода приводит к локальному повышению давления в ячейке. Этот процесс сопровождается увеличением разрядного тока и, как следствие, повышением интенсивности бомбардировки ионами металлгидридного катода. Это приводит к еще большему возрастанию давления. Таким образом осуществляется самосогласованное повышение давления рабочего газа до уровня, при котором разряд переходит в сильноточную фазу с возбуждением режима полого катода. Как правило, этот процесс занимает  $15 \div 20$  мкс.

Длительность периода от момента приложения напряжения до возбуждения режима полого металлгидридного катода зависела от величины анодного напряжения на ячейке Пеннинга и степени выработки водорода в полым катоде. Увеличение напряжения укорачивало этот период, что, по-видимому, связано с более эффективным выбиванием водорода с поверхности металлгидрида ионами с большей энергией. Следует отметить, что быстрому росту давления в ячейке Пеннинга препятствует уход частиц через выход-

ные отверстия дополнительного источника в разрядный промежуток плазменного диода.

Переход разряда Пеннинга в сильноточный режим сопровождается интенсивным истечением заряженных частиц сквозь выходные отверстия в разрядный промежуток плазменного диода. Параллельно с этим в диодный промежуток инжектируется также дополнительный электронный пучок, сформированный за счет отрицательного смещения потенциала полого катода относительно катодов ячейки Пеннинга. Дополнительный электронный пучок ионизирует нейтральный газ по оси разрядной трубки и способствует более быстрому росту концентрации плазмы в плазменном диоде.

При некотором значении концентрации плазмы в разрядной трубке плазменного диода (зависящем от разрядного напряжения, материала катода и состояния его поверхности) происходит образование катодных пятен на катоде плазменного диода. С этого момента в плазменном диоде осуществляется сильноточный режим существования разряда.

Возникновение катодных пятен сопровождается резким увеличением разрядного тока и формированием плотной прикатодной плазмы  $n_p = 10^{15} \div 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , которая расширяется со скоростью  $v_{pl} = (1 \div 6) \cdot 10^6 \text{ см/с}$  вглубь разрядного промежутка [7]. Этот процесс сопровождается

увеличением сечения токового канала, приводящему к росту тока  $I_p$ . В условиях, когда напря-

жение  $U_L = L \frac{dI_p}{dt}$  на индуктивности разрядной цепи  $L$  меньше напряжения

$$U_p(t) = V_0 - \frac{1}{C_0} \int_0^t I_p(\tau) d\tau$$

на питающем конденсаторе  $C_0$ , на фронте плазмы катодных пятен возникает двойной электрический слой объемного заряда, на котором сосредотачивается все активное напряжение

$$\text{разряда } V_a(t) = V_0 - \frac{1}{C_0} \int_0^t I_p(\tau) d\tau - L \frac{dI(t)}{dt}.$$

В слое происходит встречное ускорение ионов и электронов до энергий, определяемых  $V_a(t)$  (электроны ускоряются в сторону анода, а ионы – в сторону катода).

Длительность существования двойного слоя на фронте плазмы катодных пятен определяется временем заполнения токовым каналом всего сечения разрядной трубки [5], зависит от ее поперечных размеров и находится в пределах от долей микросекунды до нескольких микросекунд. Дальнейшее развитие разряда зависит от направления градиента концентрации плазмы в диодном промежутке. Когда плотность плазмы уменьшается по направлению к аноду плазменного диода, двойной слой перебрасывается к аноду после выхода токового канала к стенкам разрядной трубки.

Было установлено, что как при внешнем, так и при внутреннем случаях газонапуска генерация мощных электронных пучков в плазменном диоде имела место при заполнении разрядной трубки предварительной плазмой с концентрацией не ниже  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Формирование плазмы с такой плотностью в разрядной трубке происходило только после перехода режима горения разряда Пеннинга в дополнительный источник заряженных частиц от высоковольтного к сильноточному с последующим возбуждением режима полого катода. Характерные осциллограммы тока разряда  $I_p(t)$ , напряжения на разряде  $V_p(t)$  и сигналов с емкостных зондов  $V_{pr1}(t)$  и  $V_{pr2}(t)$ , установленных соответственно на расстоянии 3 см и 6 см от анода-мишени, приведены на рис. 6. Данные зависимости получены в случае внутреннего напуска водорода.

Регистрация сигналов производилась посредством 10 битного четырехканального параллельного аналого-цифрового преобразователя фирмы ADLINK Technology Inc типа PCI-9810

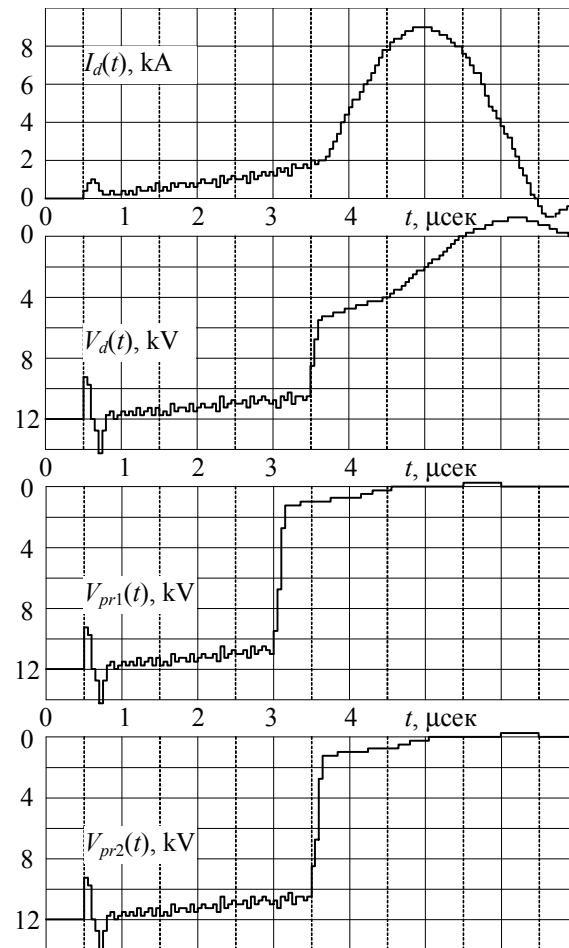


Рис. 6. Осциллограммы тока  $I_d(t)$  и напряжения  $V_d(t)$  разряда, сигналов с емкостных зондов  $V_{pr1}(t)$  и  $V_{pr2}(t)$ , установленных соответственно на расстоянии 3 см и 6 см от анода.

со временем стробирования 50 нс. Сигналы контролировались двухлучевым осциллографом типа С1-74 с последующей фоторегистрацией цифровой фотокамерой фирмы NIKON типа COOLPIX 995.

Из осциллограмм видно, что после возбуждения сильноточного разряда через время  $t = 0,5 \text{ мкс}$  все активное напряжение сосредотачивается в прианодной области на слое объемного заряда (оба емкостных зонда регистрируют высокий отрицательный потенциал). Генерация электронного пучка происходит в условиях практически линейного нарастания тока до момента времени  $t = 3,5 \text{ мкс}$ . При этом, в момент времени  $t = 2,5 \text{ мкс}$  наблюдается отход двойного слоя от анода. Об этом свидетельствует резкое снижение напряжения на зонде  $V_{pr1}$ , который расположен ближе к аноду. Напряжение на более удаленном зонде  $V_{pr2}$  в этот момент остается высоким, что свидетельствует о локализации двойного слоя в прианодной области.

Отход двойного слоя обусловлен повышением плотности плазмы у поверхности анода за счет ионизации паров материала мишени, которые об-



разуются при взаимодействии интенсивного электронного пучка с поверхностью мишени. Ток пучка в этот момент составляет  $1,5 \cdot 10^3$  А, а его энергия  $\sim 10^4$  эВ, что соответствует удельной мощности  $2,6 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Повышение плотности плазмы в прианодной области подтверждается методом отсечки СВЧ сигнала на длинах волн 3 см и 8 мм.

Генерация электронного пучка прекращается в момент времени  $t = 3,5$  мкс, когда исчезает двойной слой в связи с переходом от самостоятельного плазменно-пучкового разряда к обычному дуговому. Переход к дуговому разряду обусловлен резким повышением плотности плазмы в разрядном промежутке до значения выше критического. При этом плазма уже в состоянии за счет теплового движения перенести ток, обеспечиваемый источником питания. Повышение плотности плазмы обусловлено увеличением концентрации нейтральных частиц в пристеночной области разрядной трубки за счет взаимодействия интенсивного разряда со стенкой.

Время существования самостоятельного плазменно-пучкового разряда зависело от эрозионной стойкости как материала анода-мишени, так и материала стенки разрядной трубки. Применение для анода эрозионно-стойких материалов и хорошее обезгаживание разрядной трубки позволяло существенно увеличить время прианодного механизма генерации интенсивного электронного пучка. Однако ток пучка при этом снижался.

Следует отметить особенность применения металлгидридных материалов в качестве твердотельного источника рабочего газа. Использование внутреннего напуска водорода существенно влияло на работу как дополнительного источника заряженных частиц, так и плазменного диода. При внешнем напуске водорода заполнение разрядного промежутка плазменного диода плазмой до уровня возбуждения сильноточного разряда происходило через  $40 \div 50$  мкс после подачи напряжения на анод ячейки. В случае внутреннего напуска время возбуждения сильноточного разряда увеличивалось до  $150 \div 500$  мкс в зависимости от степени выработки водорода в металлгидридном полом катоде. Однако основным положительным моментом использования внутреннего напуска было снижение стартового рабочего давления плазменного диода до  $P_0 = 10^{-3}$  Па по сравнению с  $P_0 = 2 \cdot 10^{-2}$  Па при внешнем напуске.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана перспективность использо-

вания протяженного плазменного диода низкого давления в качестве интенсивного источника электронного пучка. Основой такого плазменного источника электронов служит новый тип газового разряда – самостоятельный плазменно-пучковый разряд, отличительной особенностью которого является формирование в разрядном промежутке двойного электрического слоя объемного заряда, в котором ускоряется интенсивный электронный пучок.

Для исключения потерь энергии электронного пучка на пучково-плазменное взаимодействие необходимо возбуждать самостоятельный плазменно-пучковый разряд М-типа с прианодным двойным слоем. Локализация двойного слоя непосредственно у поверхности анода-мишени практически исключает потери энергии электронного пучка на взаимодействие с плазмой разрядного промежутка.

Формирование плазменно-пучкового разряда М-типа происходит в условиях, когда плазма разрядного промежутка имеет градиент концентрации с минимумом у анода, максимальный ток источника питания должен в  $5 \div 10$  раз превосходить ток, который может перенести плазменный шнур в области минимума концентрации плазмы, а первичный плазменный шнур занимает все сечение разрядной трубки. Кроме того, источник предварительной плазмы, создающий первичный плазменный шнур, должен инжектировать плазму по всему сечению разрядной трубки с катодной стороны. Напуск рабочего газа так же должен осуществляться со стороны катода.

Показана возможность применения твердотельных металлгидридных систем на основе обратимых сорбентов водорода для газообеспечения сильноточных импульсных плазменных устройств низкого давления. При этом возможно создание распределения давления вдоль газоразрядной трубки с необходимыми пространственно-временными параметрами для управления местоположением зоны генерации пучков. Предложенный в работе дополнительный источник заряженных частиц на основе разряда Пеннинга с металлгидридным полым катодом позволяет создавать в разрядном промежутке плазменного диода первичную плазму с необходимыми параметрами. В отличие от известных инжекторов водорода, основанных на поверхностном пробое гидридосодержащих материалов, в данной системе минимизирована эрозия конструктивных элементов, что благоприятно сказывается на сроке службы устройства. Путем изменения внешних параметров дополнительного источника, можно относительно просто управлять

интенсивностью и длительностью формирования в плазменном диоде пучков заряженных частиц.

Для получения профиля давления водорода с большими градиентами и снижения времени запаздывания возбуждения сильноточного разряда в плазменном диоде следует использовать повышенные анодные напряжения на ячейке Пеннинга в дополнительном источнике заряженных частиц. При этом существует некоторое минимальное анодное напряжение, при котором возможно возбуждение сильноточного разряда. Данное пороговое напряжение определяется многими факторами: величиной рабочей поверхности металлгидридного полого катода, степенью его насыщения водородом, рабочим объемом и вакуумным сопротивлением выходных отверстий дополнительного источника.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Цхадая Б.А., Плюто А.А., Суладзе В.К. Формирование импульсных ионных пучков в сильноточном плазменном диоде // ЖТФ. – 1974. – Т. 44, вып. 8. – С. 1779-1780.
2. Луценко Е.И., Серeda Н.Д., Концевой Л.М. Исследование ограничения тока в сильноточном разряде // ЖЭТФ. – 1975. – Т. 69, № 6 (12). – С. 2067-2078.
3. Langmuir I. The interaction of electron and positive ion space charge of cathode sheath // Phys. Rev. – 1929. – Vol. 33, № 4. – P. 954-992.
4. Луценко Е.И., Серeda Н.Д., Целуйко А.Ф. Самостоятельный плазменно-пучковый разряд // Письма в ЖТФ. – 1987. – Т. 13, № 5. – С. 294-298.
5. Луценко Е.И., Серeda Н.Д., Целуйко А.Ф. Динамические двойные слои в сильноточных плазменных диодах // ЖТФ. – 1988. – Т. 58, вып. 7. – С. 1299-1309.
6. Луценко Е.И., Серeda Н.Д., Целуйко А.Ф., Бизюков А.А. Динамические характеристики самостоятельного плазменно-пучкового разряда // УФЖ. – 1988. – Т. 33, вып. 5. – С. 730-736.

#### ФОРМУВАННЯ ІНТЕНСИВНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ У ПРОТЯЖНОМУ ПЛАЗМОВОМУ ДІОДІ З МЕТАЛОГІДРИДНИМ ІНЖЕКТОРОМ ПЕРВИННОЇ ПЛАЗМИ

О.Ф. Целуйко, В.М. Бориско, Д.В. Зінов'єв, А.О. Дробішевська, Є.В. Клочко

У статті розглянута можливість створення автономного сильноточного джерела електронного пучка на основі імпульсного самостійного плазмово-пучкового розряду М-типу. Для створення первинної плазми використовується відбиваючий розряд з порожнистим металогідридним катодом, що забезпечує імпульсну подачу водню до газорозрядної камери. Як матеріал металогідридного катода використовувався гетерний сплав  $Zr_{50}V_{50}$ . Наведені результати досліджень термодесорбційних властивостей такого металогідридного катода, оптимізовані параметри додаткового джерела заряджених частинок та умов формування інтенсивних електронних пучків у самостійному плазмово-пучковому розряді.

7. Луценко Е.И., Серeda Н.Д., Целуйко А.Ф., Бизюков А.А. Сильноточный двойной слой на фронте плазмы катодных пятен // Письма в ЖТФ. – 1984. – Т. 10, № 22. – С. 1349-1353.
8. Бизюков А.А., Серeda К.Н., Серeda Н.Д., Слепцов В.В., Перевозчиков Б.Н. Сильноточный импульсный источник ионов с испаряемым анодом // Приборы и техника эксперимента. – 1996. – № 6. – С. 112-114.
9. Borisko V.N., Tselujko A.F., Lazurik V.T., Zinov'ev D.V., Borisko S.V. Intensive X-ray generator on the basis of low pressure plasma diode // Proceeding of 29 EPS Conferences on Plasma Physics and Controlled Fusion. – Montreux (Switzerland). – 2002. – P. 4.029.
10. Borisko V.N., Zinov'ev D.V., Tseluyko A.F., Drobyshevskaya A.A., Klochko Ye.V. The formation of the intensive electron beams in the plasma diode with metal hydride injector of plasma // Proceeding of the 30th European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics. – St. Petersburg (Russia). – 2003. – P.4.102.
11. G. Sandrock. Hydrogen metal systems // Hydrogen Energy System. – 1995. – Vol. 295. – P. 135-166.
12. A. Stern, A. Resnik and D. Shaltiel. Thermal desorption spectra of hydrogen in  $HfV_2H_x$  and  $ZrV_2H_x$  // J. Less-Common Met. – 1982. – Vol. 88. – P. 431-440.
13. Луценко Е.И., Серeda Н.Д., Целуйко А.Ф. Динамические двойные слои в прямом разряде // Тезисы доклада. III Всесоюз. конф. по физике газового разряда. – Киев. – 1986. – Ч. 3. С. 446 - 448.
14. Вакуумные дуги. / Под ред. Дж. Лафферти. – М.: Мир, 1982. – 432 с.
15. Неэлин М.В. Динамика пучков в плазме. – М.: Энергоиздат, 1982. – 264 с.
16. Бойм А.Б., Рейхрудель Э.М. Холодный катод с поджигом в электронной пушке // ЖТФ. – 1963. – Т. 33, Вып. 8. – С. 996-1003.
17. Tselujko A.F., Bizukov A.A., Kashaba A.Y., Sereda K.N. Multichannel Source of Synthesized Ion-Electron Flow // Review of Scientific Instruments. – 1996. – Vol. 67, № 12. – P. 4117-4119.

#### THE INTENSIVE ELECTRON BEAM FORMATION IN THE EXTENDED PLASMA DIODE WITH METAL HYDRIDE INJECTOR OF THE PRELIMINARY PLASMA

A.F. Tseluyko, V.N. Borisko, D.V. Zinov'ev, A.A. Drobyshevskaya, Ye.V. Klochko

The opportunity of creating independent high-current source of an electron beam on the basis of the pulse independent plasma-beam discharge of M-type is considered in this paper. For creation of preliminary plasma the reflective discharge with the hollow metal hydride cathode which provides pulse admission of hydrogen in the discharge chamber is used. The getter hydride formative alloy  $Zr_{50}V_{50}$  as a material of the metal hydride cathode was used. The results of the researches into thermal desorption properties of such metal hydride cathode are reported. The parameters of the additional source of charged particles and conditions of the intensive electronic beam formation in the independent plasma-beam discharge are optimized.