

## ИСТОЧНИК ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ НА БАЗЕ ПЛАНАРНОГО МАГНЕТРОНА

*И.А.Битная,  
В.Н.Бориско,  
Е.В.Клочко,  
А.Ф.Целуйко*

*Харьковский государственный университет,  
Харьков, 310108, пр. Курчатова, 31*

Предложен источник отрицательных ионов различных газов на базе планарного магнетрона. Работа источника основана на эффекте торможения электронов в скрещенных  $[E \times H]$ -полях и способности низкоэнергетических электронов участвовать в генерации отрицательных ионов за счет механизма диссоциативного прилипания к возбужденным в плазме разряда молекулам

рабочего газа. Экспериментально проверены способы оптимизации работы источника за счет использования сплавов с большим коэффициентом вторичной эмиссии, а также металлгидридных геттерных сплавов, способных при определенных условиях эффективно десорбировать колебательно-возбужденные молекулы водорода.

Использование широкоапертурных пучков отрицательных ионов для научных исследований и технологических процессов требует разработки новых видов ионных источников.

Основным механизмом формирования отрицательных ионов является процесс диссоциативного прилипания низкоэнергетических электронов к возбужденным молекулам газов, способных образовывать отрицательные ионы, таких как водород, кислород, фтористые соединения серы и т. п. Очевидно более эффективным оказывается формирование отрицательных ионов в плазме разрядов, так как такой метод создания пучков отрицательных ионов позволяет избежать использования Cs, который необходим для формирования отрицательных ионов на поверхности [1-3]. Кроме того, использование области разряда, заполненной плазмой, позволяет отказаться от сложных конструкций источников из двух камер для отдельного формирования низкоэнергетических электронов и возбужденных молекул газа [4-6].

В работе представлено исследование простой конструкции планарного магнетрона в качестве источника отрицательных ионов. На рис. 1 показана конструкция планарного магнетрона. Катод (1) расположен на расстоянии около 10 мм от кольцевого анода (2). Постоянный магнит (3), расположенный под охлаждаемым катодом, создает магнитное поле арочной конфигурации с продольной компонентой около 500 Э вблизи поверхности катода. Анод соединен с заземленной камерой установки. Напряжение на катоде изменялось в пределах  $U = 0 - (-1000)$  В. Таким образом, в разрядном промежутке создавалась область со скрещенными  $[E \times H]$  полями (9). Электроны, выбиваемые из поверхности катода за счет ионной бомбардировки, в таких условиях движутся по циклоидальным траекториям. В устройстве было использовано симметричное заполнение разрядного промежутка — рабочий газ подавался в область катода через отверстие (4) в аноде, затем через кольцевой и вертикальные каналы в изоляторе (5). В качестве рабочих газов в экспериментах использовались водород, кислород, шести фтористая сера и аргон для контрольных экспериментов.

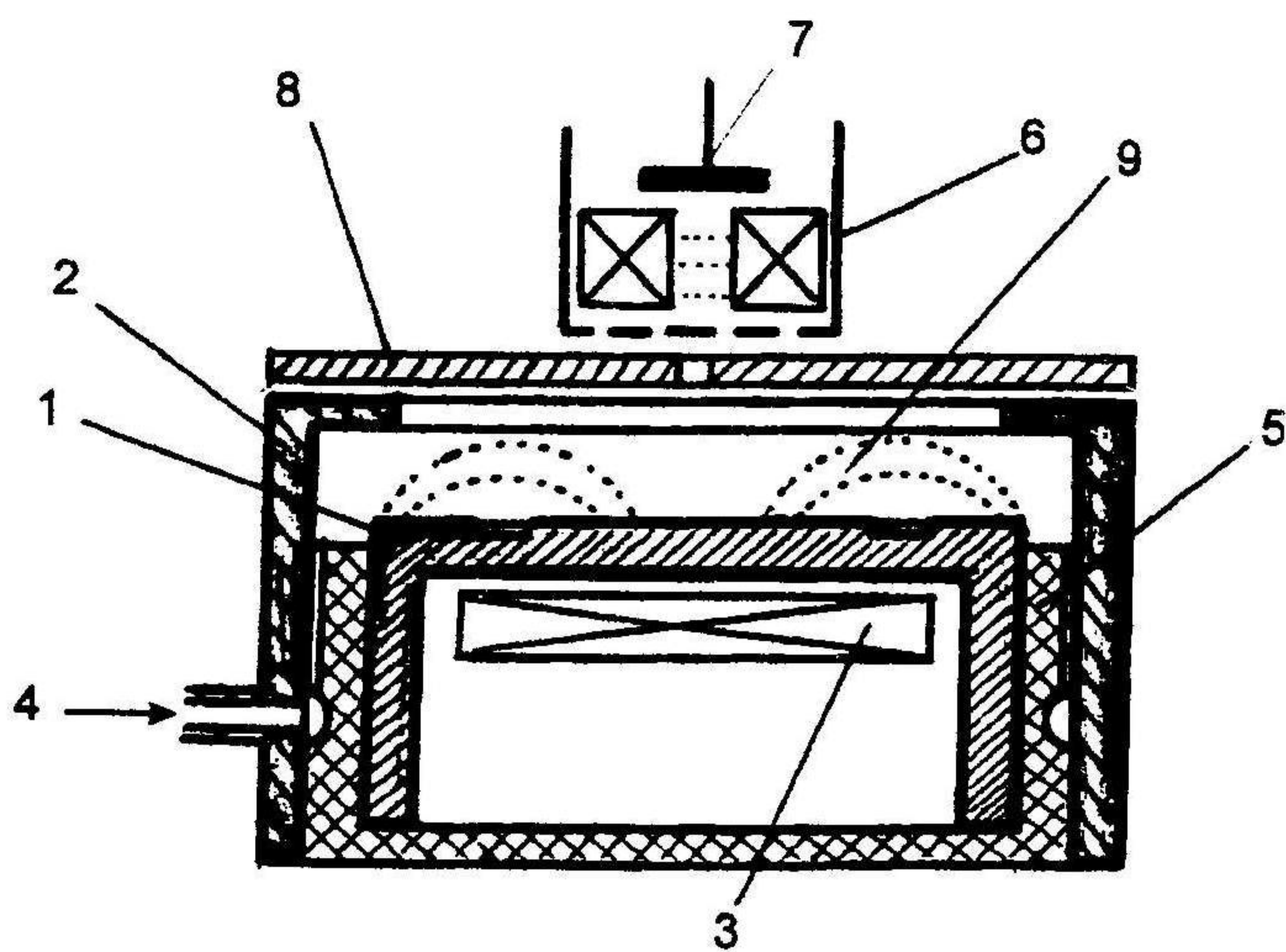


Рис. 1. Схема экспериментального устройства

лась диафрагмой (8) с отверстием диаметром 3 мм. В таких условиях давление в измерительной камере было на порядок меньше, чем в области разряда. Таким образом, создавалась возможность проводить измерения в бесстолкновительном режиме. В некоторых экспериментах в качестве материала катода был использован сплав AlMg с целью исследования роли вторичных электронов в процессе генерации отрицательных ионов водорода в источнике. Было исследовано также влияние колебательно-возбужденных состояний молекул водорода, эмитируемых из металлогидридного сплава в магнетронный разряд, для формирования отрицательных ионов. Предполагалось, что разогрев металлогидрида до температуры, необходимой для эффективной десорбции молекул водорода, будет осуществляться за счет разрядного тока.

Как уже упоминалось предпочтительным механизмом формирования отрицательных ионов является механизм диссоциативного прилипания низкоэнергетичных электронов к возбужденным молекулам электроотрицательных газов. Скрещенные  $[E \times H]$  поля в разрядном промежутке планарного магнетрона создают электромагнитную ловушку для электронов. В такой ловушке электроны вынуждены двигаться по циклоидальным траекториям и не могут достичь больших энергий. Таким образом, в разрядном промежутке планарного магнетрона должно накапливаться большое количество низкоэнергетичных электронов, которые мы и попытались использовать для генерации пучка отрицательных ионов.

Типичные режимы работы магнетронного разряда были следующие: анод заземлен; напряжение на катоде  $U_p = -(200 - 400)$  В; разрядный ток  $I_p = 80 - 250$  мА; интервал давлений рабочего газа  $p = (0,1 - 10)$  Па. При этих условиях в планарном магнетроне зажигался стабильный самостоятельный разряд. Вольтамперная характеристика такого разряда показана на рис. 2 (кривая 1). Зависимость близка к линейной в случае использования катода из нержавеющей стали. Из вида характеристики можно сделать вывод о том, что в исследуемых условиях зажигается разряд, аналогичный аномальному тлеющему разряду. На рис. 3 показаны зависимости тока отрицательных ионов от величины магнитного поля в зазоре магнитного анализатора при использовании различных электроотрицательных газов. Из рисунка видно, что сопутствующие электроны покидают поток ионов при магнитных полях в зазоре около 50 Э для кислорода и водорода. Плотности токов пучков отрицательных ионов на расстоянии 1,5 см от поверхности анода при использовании различных рабочих газов были следующие:  $I_i \approx 0,6$  мкА/см<sup>2</sup> для водорода,  $I_i \approx 0,4$  мкА/см<sup>2</sup> для кислорода и  $I_i \approx 1$  мкА/см<sup>2</sup> для шестифтористой серы. В разряде с SF<sub>6</sub> в качестве рабочего газа наблюдался заметный рост тока отрицательных ионов (рис. 3, кривая 3). В случае, когда на вытягивающие электроды подавалось напряжение +30 В, наблюдался заметный рост тока отрицательных ионов. Ток отрицательных ионов возрастал в 2 раза для кислоро-

В экспериментах ток отрицательных частиц регистрировался с помощью заземленного вытягивающего электрода магнитного анализатора (6). Заряженные частицы проходили через магнитный фильтр, который представлял собой регулируемое по величине поперечное потоку частиц магнитное поле. Измерительная схема позволяла также подавать на вытягивающий электрод (7) смещение до 50 В, для улучшения условий вытягивания ионов. С целью получения более надежных результатов в экспериментах с водородом создавался перепад давлений между разрядным промежутком и измерительной камерой. Область разряда закрыва-

да и в 8 раз для водорода по сравнению с предыдущими экспериментами с заземленным коллектором.

Вышеизложенные результаты были получены в условиях столкновительного режима, когда давление рабочего газа было одинаковым, как в разрядном промежутке, так и в диагностической камере. В этих экспериментах давление превышало величину порядка 1 Па. Для изучения распространения пучка отрицательных ионов водорода в бесстолкновительных условиях в экспериментальном устройстве создавался перепад давлений. При использовании диафрагмы (8) давление в диагностическом объеме составляло величину  $(4-6) \times 10^{-3}$  Па при тех же разрядных условиях. Из рисунка 3 (кривая 4) видно, что поток вытягиваемых отрицательных ионов в диагностическом объеме содержит незначительное количество сопутствующих электронов, которые, по-видимому, уходят на заземленную диафрагму. Благодаря отсутствию потерь, обусловленных столкновениями и перезарядкой при транспортировке пучка, плотность тока отрицательных ионов увеличилась до  $I_i \approx 2$  мкА/см<sup>2</sup>.

Итак, экспериментально показана принципиальная возможность образования отрицательных ионов в планарном магнетроне при использовании низкоэнергетичных электронов разряда.

Для изучения возможности увеличения токовой эффективности магнетронного источника ионов был использован AlMg сплав в качестве катода. Предполагалось исследовать роль вторичных электронов в процессе формирования отрицательных ионов и AlMg сплав был выбран, так как коэффициент вторичной эмиссии для такого сплава в 10 раз превышает коэффициент вторичной эмиссии для нержавеющей стали. Измерения показали, что ток отрицательных ионов возрос в 1,3 раза по сравнению со случаем использования нержавеющей стали. Таким образом, вклад вторичных электронов в генерацию отрицательных ионов был замечен, однако недостаточно велик, что свидетельствует о том, что в разряде, по-видимому, действительно мало высокоэнергетичных электронов и основную роль в формировании отрицательных ионов играют низкоэнергетичные электроны, движущиеся по циклоидальным траекториям в скрещенных  $[E \times H]$  полях.

С целью выяснения влияния колебательно-возбужденных состояний молекул рабочего газа на процесс образования отрицательных ионов в экспериментальном устройстве катод

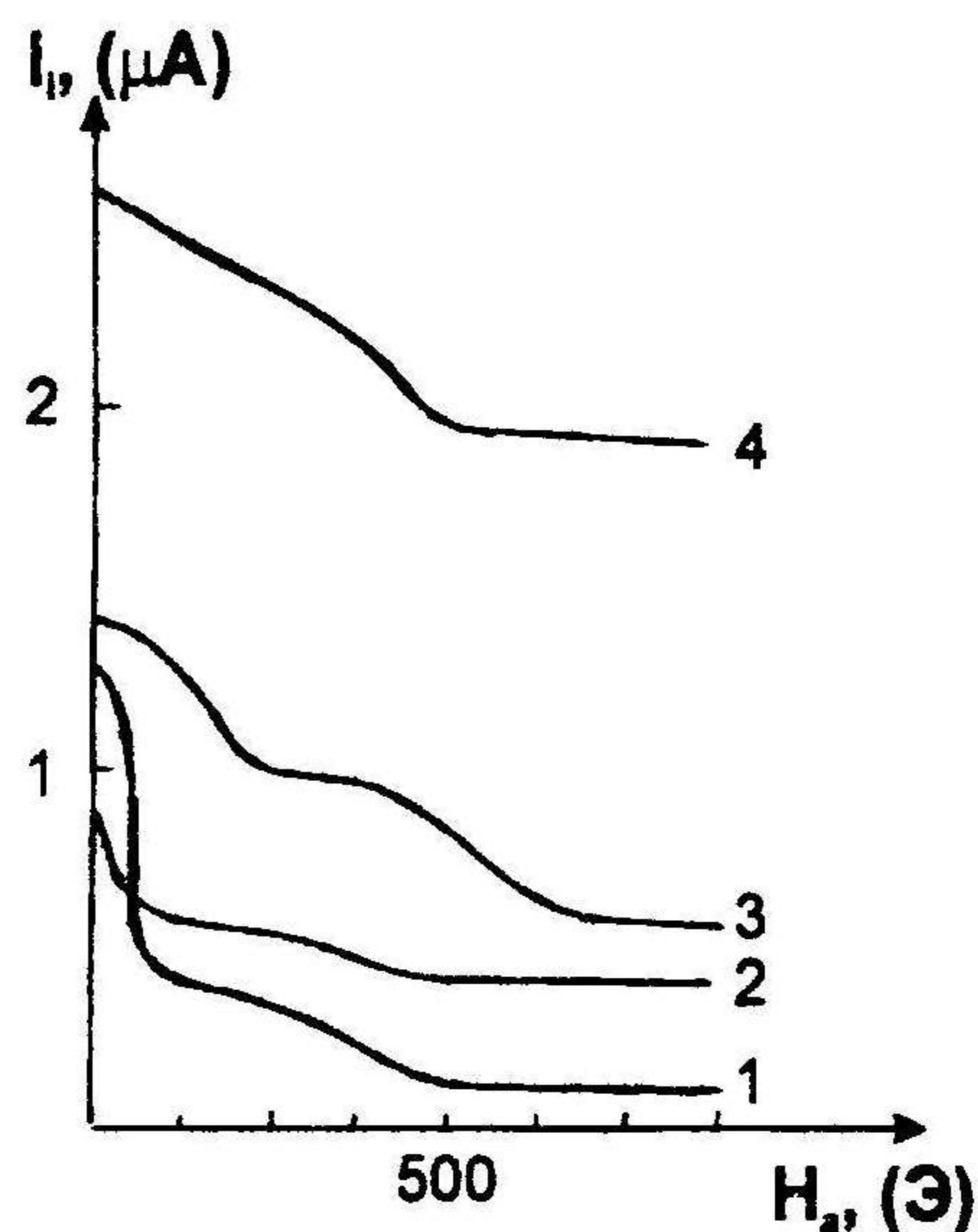
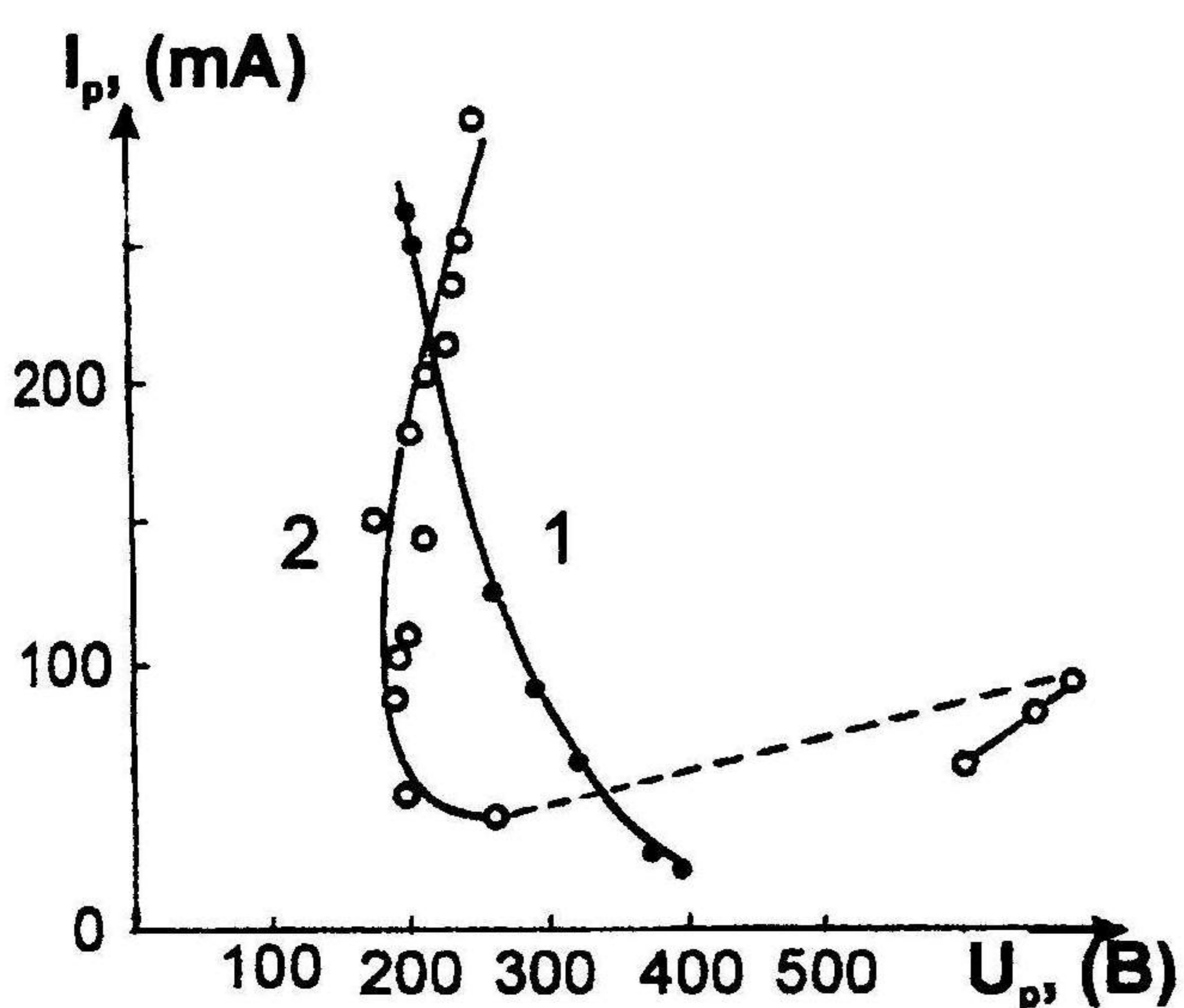


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика разряда.

Рис. 3. Зависимость тока отрицательных частиц от величины магнитного поля в зазоре магнитного анализатора: 1 — кислород, 2 — водород, 3 — SF<sub>6</sub>.

был изготовлен из геттерного сплава, способного аккумулировать значительные количества водорода и при определенных условиях десорбировать его в возбужденном состоянии. В этом случае сечение процесса диссоциативного прилипания должно быть, по крайней мере, в 10 раз больше. Таким образом, может быть создан эффективный источник отрицательных ионов водорода с автономным и безопасным твездотельным генератором рабочего газа. Мы исходили из предположения, что десорбция водорода должна быть обусловлена нагревом геттерного сплава за счет тока разряда и дополнительный нагрев не потребуются. Вольтамперная характеристика разряда с геттерным сплавом Zr-V-Fe в виде порошка, покрывающего поверхность катода, показана на рис.2 (кривая 2). Вид кривой свидетельствует о накоплении водорода в разрядном промежутке, что приводит к более эффективной работе разряда — больший ток разряда достигается при меньшем падении напряжения на электродах. Такое поведение разряда может быть объяснено достаточно эффективным нагревом геттерного сплава разрядным током. Измерения показали, что ток отрицательных ионов увеличился в 1,5 раза по сравнению с тем случаем, когда в источнике использовался водород из баллона.

Результаты измерения плотности плазмы вблизи торцевой поверхности анода представлены на рис.4. Хорошо видно, что значительный рост плотности плазмы наблюдается в случае использования металлогидридного катода, когда разрядный ток достигает величины, достаточной для нагрева сплава до температуры, необходимой для эффективной эмиссии возбужденного водорода. Таким образом, не было необходимости в дополнительном нагреве геттерного сплава. Температура электронов достигала 2-3 эВ и была почти постоянной величиной по всему сечению потока плазмы.

Важным параметром ионных источников является энергетическая и газовая эффективность. Расчеты показали, что энергетическая эффективность возросла на 55% в случае использования металлогидридного катода. Использование сплава AlMg дает рост энергетической эффективности на 7%.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Koclover, Karim, Rynn. New plasma source based on surface ionization // J. Appl. Phys. — 1985. — 58. — № 1.
- [2] R.L.York and R.L.Stevens. Jr. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS — 30, 1983. — p. 2705.
- [3] Деревянко Г.Е., Дудников В.Г. Поверхностно-плазменный источник ионов // ПТЭ. — 1987. — № 3. — с. 31.
- [4] Ориент О., Чутджиан А., Аладжаджиан. Новый источник отрицательных ионов // ПНИ. — 1985. — 1. — с. 78.
- [5] Йорк, Стивенс, Леунг, Элерс. Вывод пучков ионов H<sup>-</sup> из мультипольного источника с магнитным фильтром. // ПНИ, 1984. — № 5. — с. 26-31.
- [6] Холмс, Даммерц, Грин. Получение электронов и ионов H<sup>-</sup> в источнике с мультипольным полем. // ПНИ, 1985. — №9.- с. 10-17.

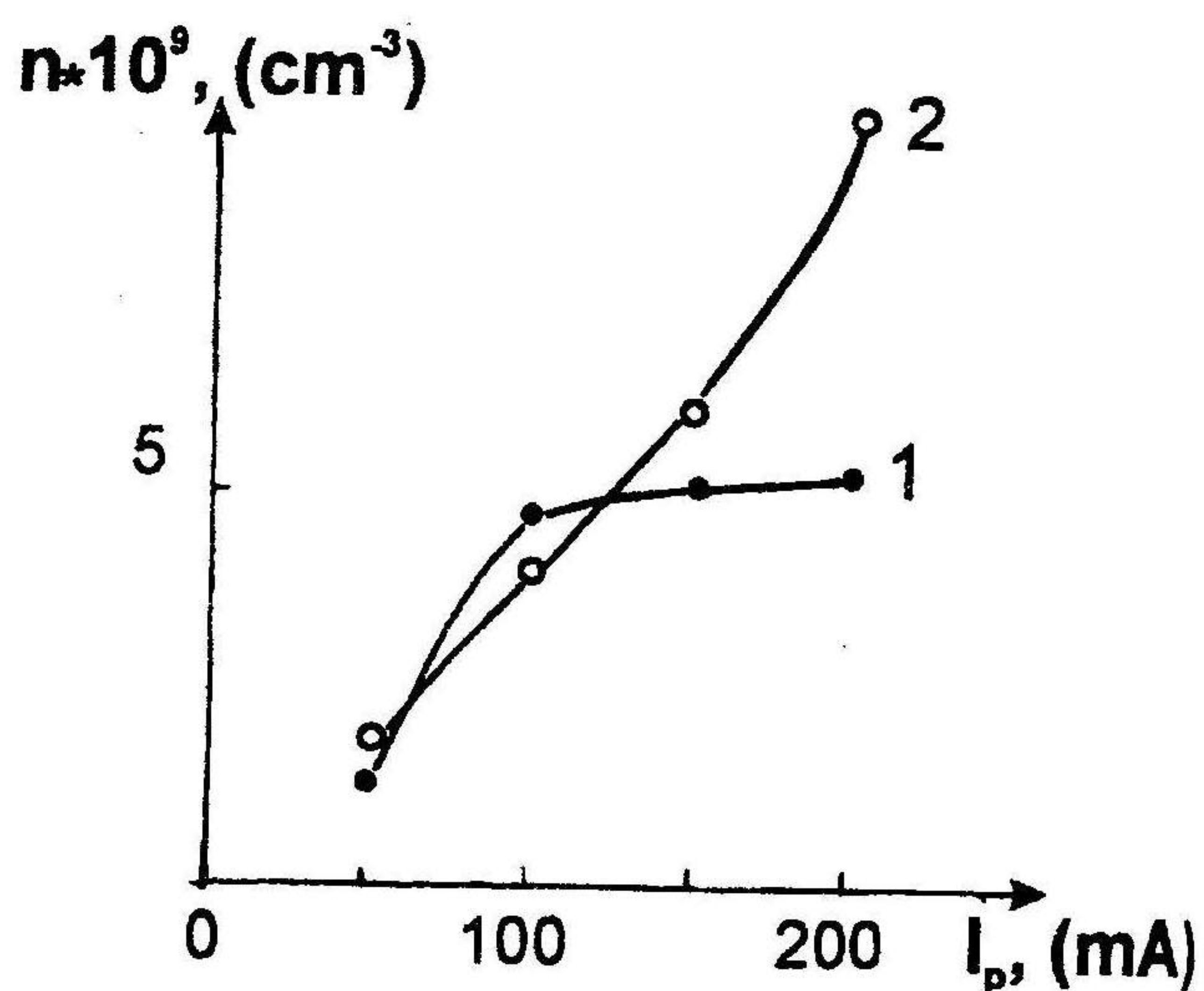


Рис.4. Зависимость плотности плазмы от разрядного тока: 1 — катод из нержавеющей стали, балонный водород; 2 — катод из металлогидридного сплава.