

## ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

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

И.А. Битная,  
В.Н. Бориско,  
Ю.В. Сидоренко

Проведено исследование источника отрицательных ионов на основе электрически несимметричного разряда с осциллирующими электронами. Эффективность работы источника обусловлена использованием катодов из материалов с высоким коэффициентом вторичной электронной эмиссии (сплав Al-Mg). Наличие в таком разряде большого числа низкоэнергетичных вто-

ричных электронов позволяет обеспечить эффективное образование отрицательных ионов за счет механизма захвата электрона молекулой рабочего газа с последующей диссоциацией этой молекулы (диссоциативное прилипание). Экспериментально показано, что с точки зрения увеличения выхода ионов  $F^-$  более эффективным оказывается использование в качестве рабочего газа  $SF_6$ .

Получение пучков отрицательных ионов представляет значительный интерес во многих областях науки и техники. Среди них — широкий круг фундаментальных исследований в области ядерной физики, осуществления нагрева плазмы в термоядерных установках, а также различные технологические процессы [1].

Отражательный пеннинговский разряд нашел важное применение в источниках, генерирующих пучки отрицательных ионов [2-5]. Наиболее эффективным механизмом образования отрицательных ионов в объеме плазмы является диссоциативное прилипание холодных электронов  $kT_e < 10$  эВ к молекулам рабочего газа, возбужденным на высокий колебательный уровень [5]. Образование колебательно-возбужденных молекул в плазме осуществляется в основном сравнительно быстрыми электронами. Поэтому, с одной стороны, для создания колебательно-возбужденных молекул необходимы быстрые электроны, а с другой стороны для наработки отрицательных ионов необходимы медленные электроны. Данное противоречие обойдено рядом авторов [6] с помощью разделения камеры источника на две части. В первой части поддерживается разряд, в котором происходит генерация плазмы и возбуждение молекул, а во второй части, отделенной от первой магнитным барьером, происходит основная наработка отрицательных ионов. Необходимое при этом охлаждение электронов осуществляется по мере диффузии их поперек магнитного барьера. Осуществление такой двухкамерной системы позволяет увеличить выход отрицательных ионов. В источнике, описанном в [7], используются пучки электронов и молекул газовой мишени, а не диффузная плазма. В этом источнике осуществлен поворот траекторий электронов в пучке с образованием в точке их поворота такого распределения электронов по скоростям, которое имеет в середине нулевую скорость.

В настоящей работе проведено исследование технически более простого источника отрицательных ионов на базе отражательного разряда Пеннинга, принцип работы которого не требует разделения объема на две камеры. Процесс образования отрицательных ионов осуществлялся в диффузной плазме за счет диссоциативного прилипания низкоэнергетичных электронов, поступающих в газоразрядную плазму в результате вторичной электронной



эмиссии с катода. В качестве первичных электронов использовались электроны газоразрядной плазмы, ускоряющиеся в электрическом поле отражающих катодов. Повышение токовой эффективности источника достигалось использованием катода из материалов с высоким коэффициентом вторичной электронной эмиссии.

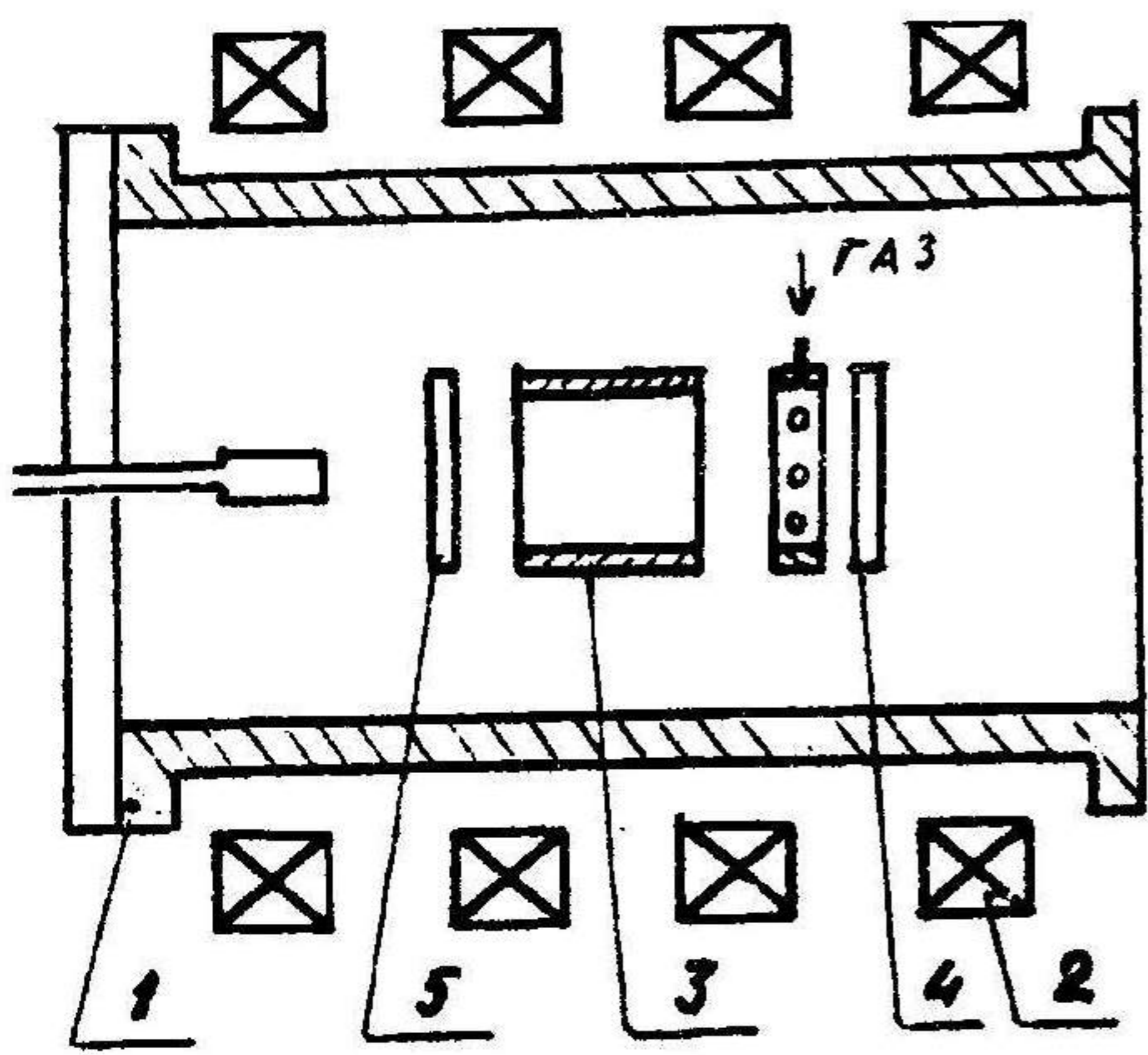


Рис.1. Схема экспериментальной установки. (1 — вакуумная камера, 2 — магнитная система, 3 — анод, 4,5 — отражательные электроды)

да (4). В качестве рабочих газов использовались  $SF_6$  и  $CF_4$ . Исследования проводились в диапазоне давлений ( $10^{-3} \div 10^{-1}$ ) Па.

Вольт-амперные характеристики разряда (рис.2) свидетельствуют о наличии в исследуемом диапазоне параметров так называемых "сильноточных" режимов, когда при значительном изменении разрядных токов величина падения напряжения на разряде остается практически неизменной.

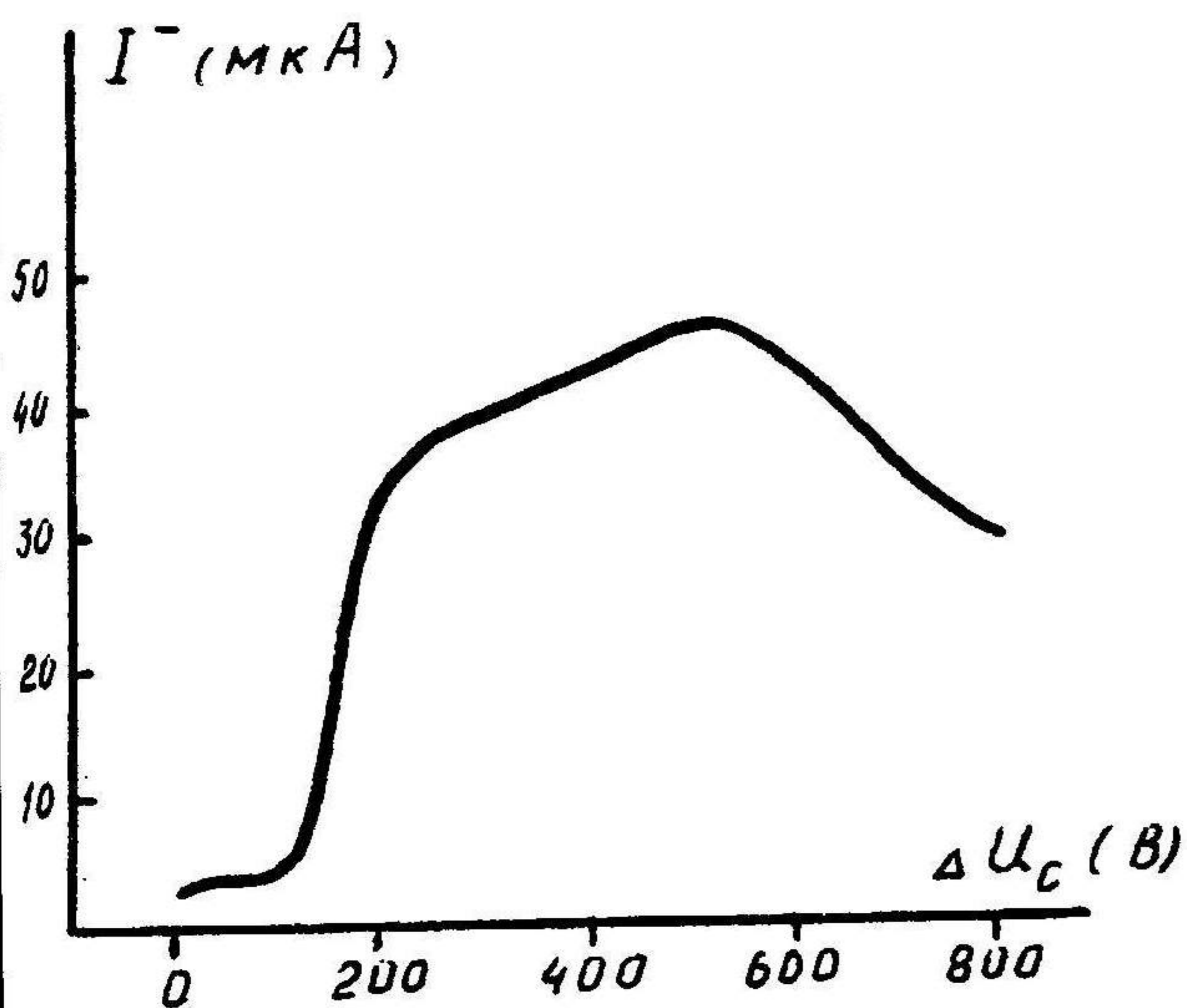


Рис.3. Зависимость тока отрицательных ионов от разности потенциалов между катодами. Газ -  $SF_6$ ,  
 $p = 3 \cdot 10^{-4}$  мм. рт. ст.,  
 $H = 800 \text{ Э}$ ,  $I_p = 50 \text{ мА}$ ,  
 $U_p = 1,1 \text{ кВ}$ .

Эксперименты проводились на установке, представляющей собой газоразрядную ячейку Пеннинга (рис.1). Анод (3) разрядной системы был изготовлен из нержавеющей стали диаметром 55 мм и длиной 60 мм. Плоские отражательные катоды (4) и (5) диаметром 55 мм были изготовлены из сплава Al-Mg и Al соответственно и располагались на расстоянии 25 мм от анода. Общая длина разрядного промежутка составила 110 мм. Система электродов помещалась в однородное продольное магнитное поле, величина напряженности которого могла изменяться в пределах 0 - 1кЭ. Схема электропитания разрядных электродов обеспечивала независимую регулировку потенциалов на отражающих катодах в диапазоне 0-2кВ. Потенциал анода устанавливался равным потенциалу земли. Подача рабочего газа осуществлялась в область катода

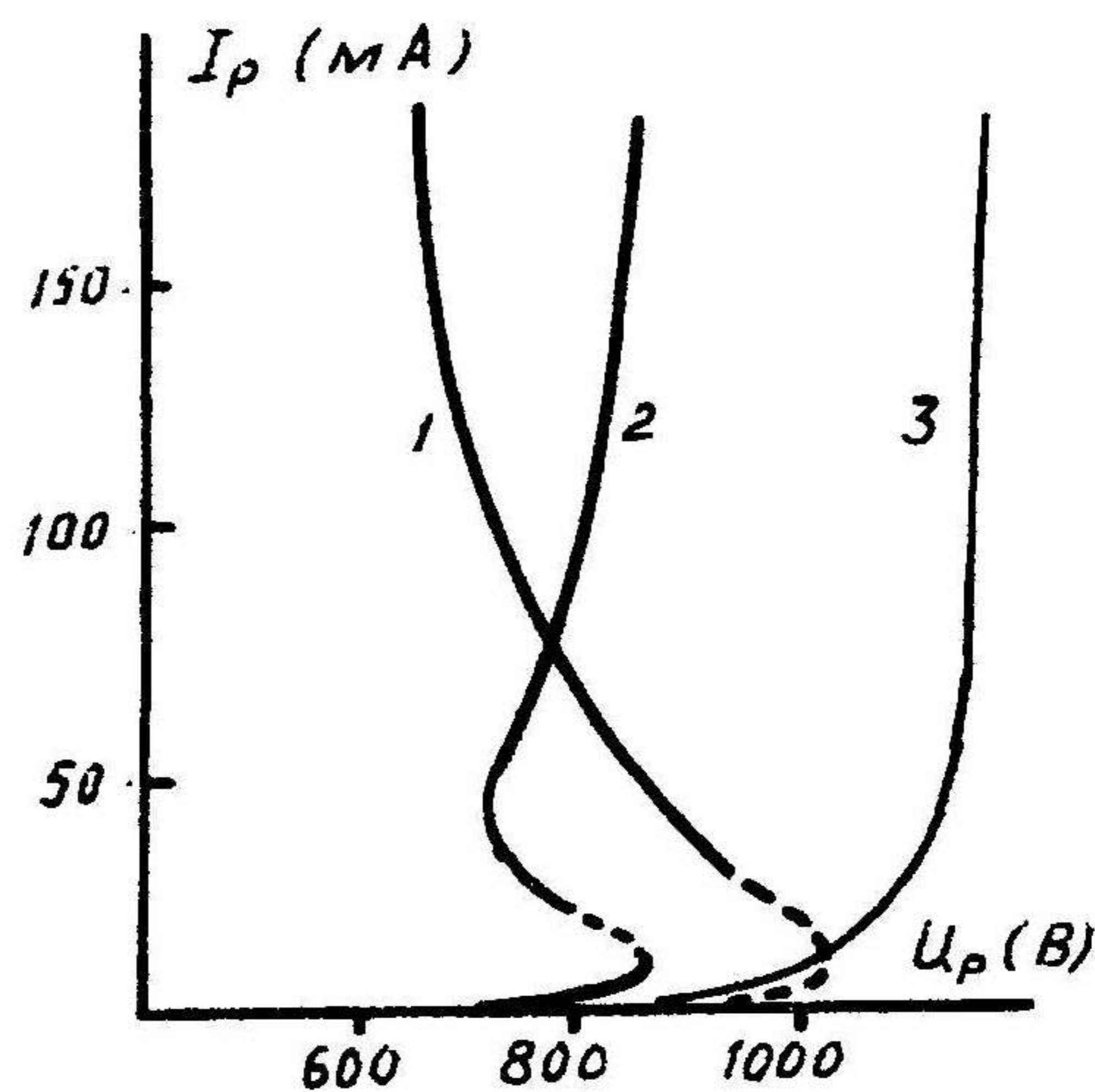
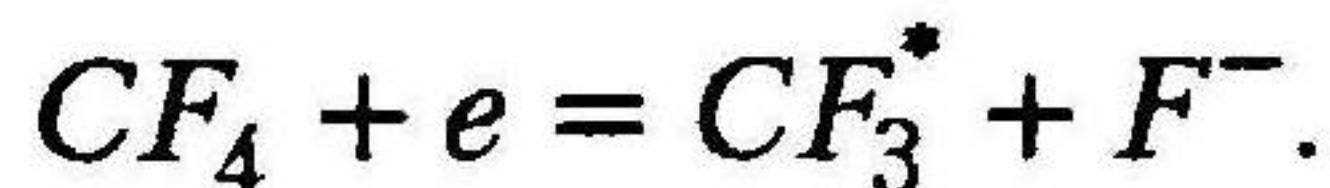
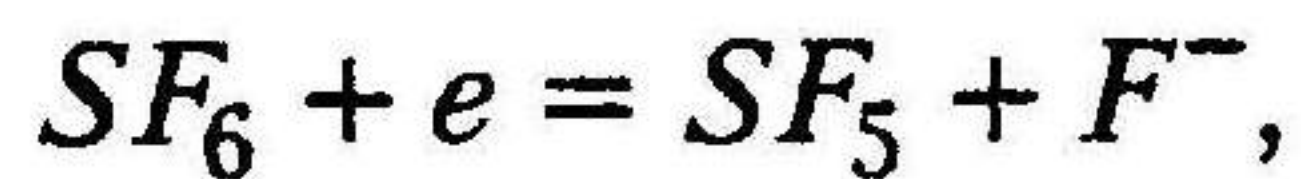


Рис.2. Вольт-амперные характеристики разряда для разных сортов газа при  $P = 10^{-4}$  мм. рт. ст.,  $H = 800 \text{ Э}$ ,  $U_c = 500 \text{ В}$ . Кривая 1- остаточный газ, кривая 2 -  $SF_6$  и кривая 3 - Ar.



Рабочий режим источника выбирался в пределах “сильноточных” диапазонов разряда таким образом, чтобы получить максимум вторичных электронов в области катода (4), который был изготовлен из сплава Al-Mg. Максимум коэффициента вторичной электронной эмиссии для исследуемого сплава наблюдается при энергии первичных электронов вблизи 500эВ, поэтому катоды находились под разными отрицательными потенциалами. При этом величина коэффициента вторичной электронной эмиссии достигала значения  $\sigma \approx 10$ , а энергия вторичных электронов составляла величину порядка нескольких эВ [8]. Исследуемый диапазон параметров следующий: величины давления рабочего газа  $P \approx (1 \div 5) \cdot 10^{-2}$  Па, напряженности магнитного поля  $H_z = 600 \div 800$  Э, разрядного тока  $I > 50$  мА при величине разности потенциалов на отражающих катодах порядка 500 В. В этом диапазоне в устройстве создавалась плазма с максимальной плотностью электронов на оси  $n_{e \text{ max}} \approx (0.5 \div 1) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$  и температурой  $T_e \approx 8 \div 20$  эВ. В таком разряде ионы плазмы выбивают электроны из катода (5) при значении коэффициента ион-электронной эмиссии  $0,2 \div 0,5$  единиц. Эти электроны, двигаясь вдоль силовых линий внешнего магнитного поля бомбардируют отражательный катод (4) из Al-Mg, который одновременно является мишенью. В область мишени (4) осуществлялась подача рабочего газа  $\text{SF}_6$  либо  $\text{CF}_4$  и в результате диссоциативного прилипания низкоэнергетичных вторичных электронов к молекулам рабочего газа вблизи катода — мишени происходило образование отрицательных ионов по схеме:



Извлечение пучков отрицательных ионов осуществлялось перпендикулярно силовым линиям магнитного поля системой вытягивающих электродов, которая была расположена на расстоянии 1 мм от мишени (4). При таком способе извлечения отрицательных ионов сепарация от сопутствующих электронов происходит автоматически. Они уходят вдоль силовых линий внешнего магнитного поля. Полученный таким образом пучок отрицательных ионов  $\text{F}^-$  имел плотность тока  $(0,4 \div 0,5) \text{ мА/см}^2$

На рис.3 представлена зависимость выхода отрицательных ионов от величины разности потенциалов между отражающими катодами  $\Delta U_c$ . При  $\Delta U_c = (500 \div 600)$  В наблюдался максимальный ток пучка. Сдвиг в обе стороны от этой оптимальной величины приводит к монотонному спаду токовой зависимости, что связано с уменьшением эмитируемых вторичных электронов с поверхности катода — мишени [8].

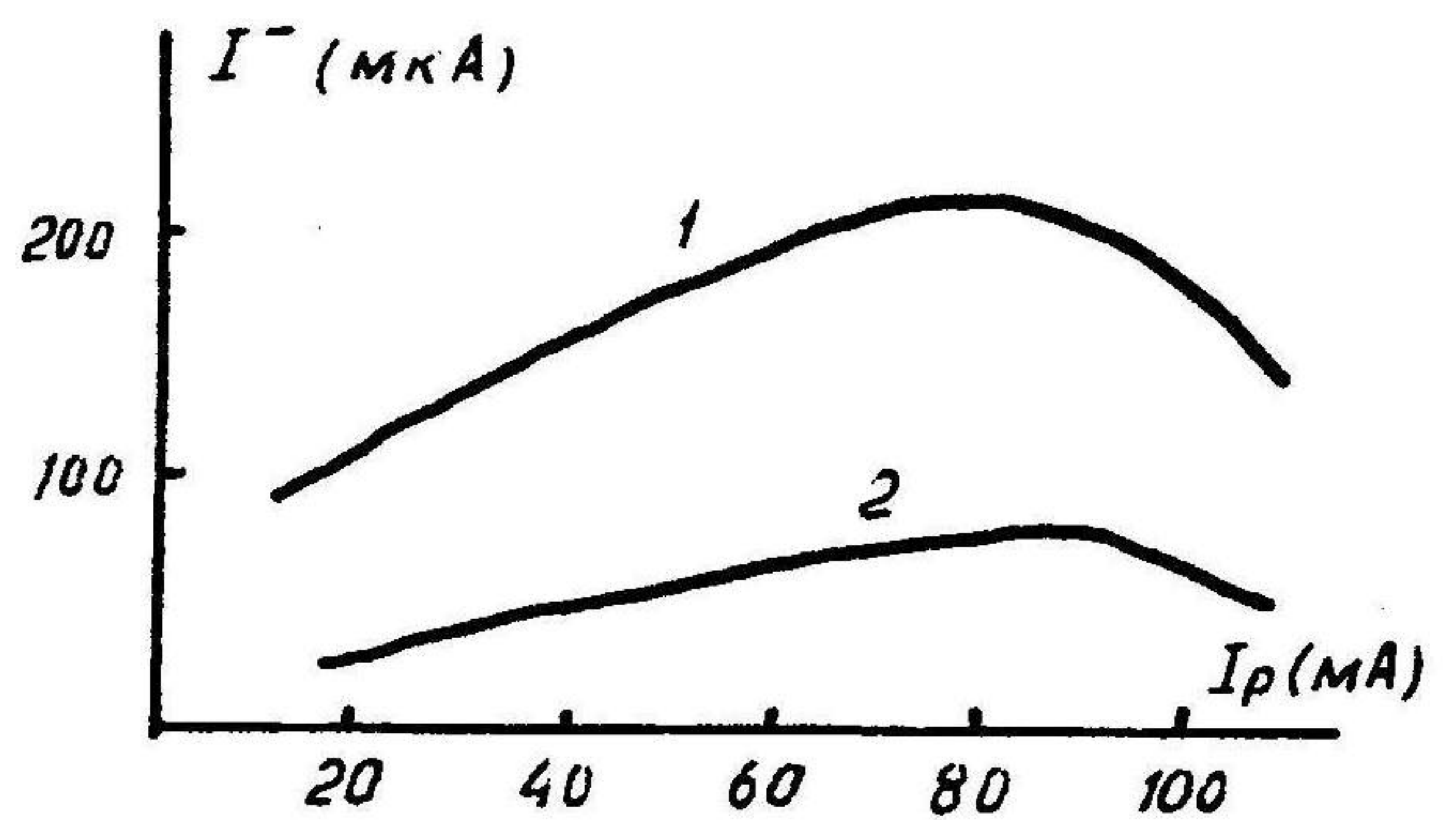
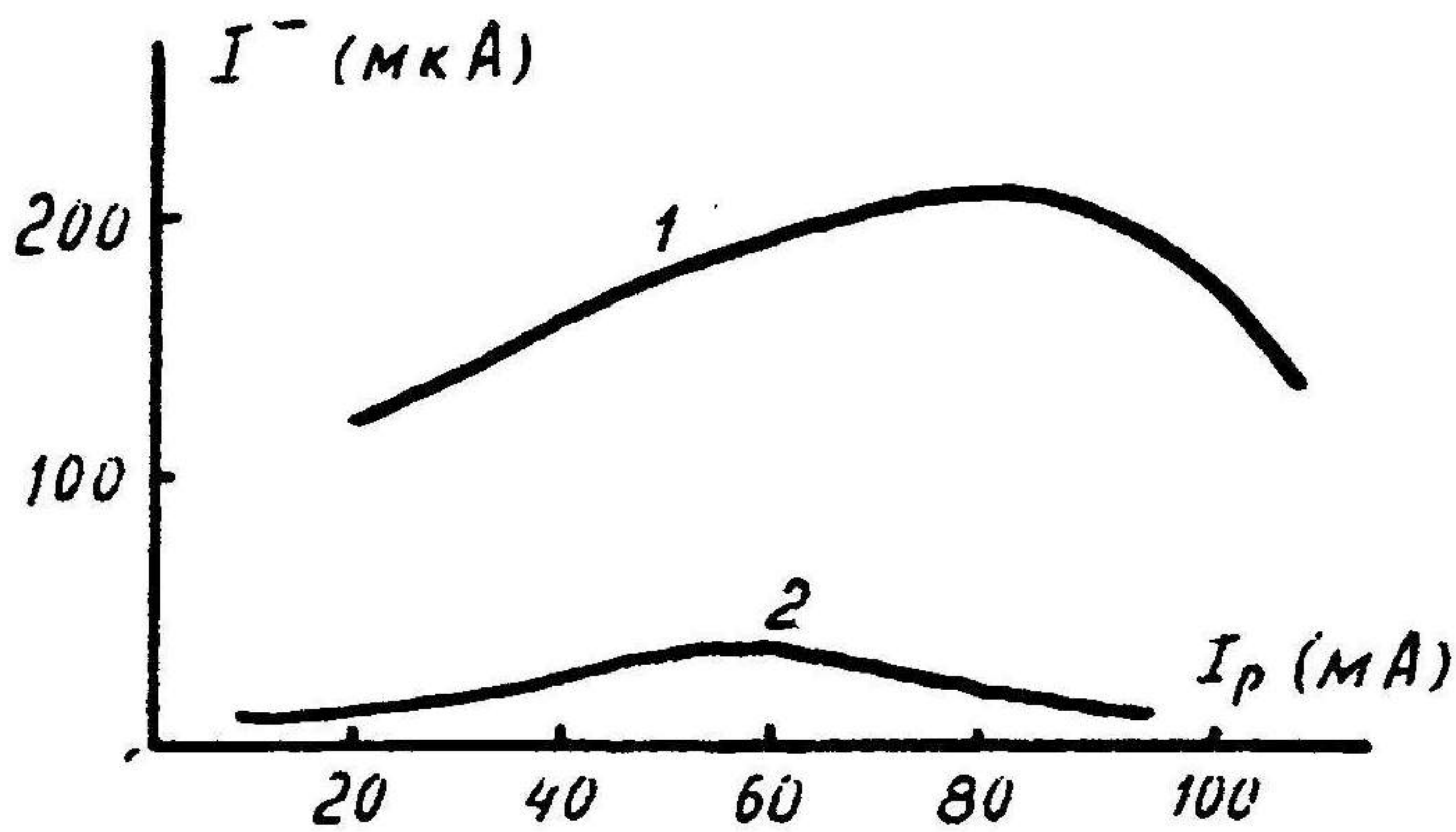


Рис.4. Зависимость тока отрицательных ионов от тока разряда для разных катодов (4). Кривая 1 — сплав Al-Mg, кривая 2 — нержавеющая сталь.

Рис.5. Зависимость тока отрицательных ионов от величины тока разряда для разных сортов газа. Кривая 1 —  $\text{SF}_6$ , кривая 2 —  $\text{CF}_4$ .  $P = 5 \cdot 10^{-4}$  мм. рт. ст.,  $H = 800$  Э,  $U_c = -500$  В.



С целью выяснения влияния материала мишени на величину тока извлекаемого пучка отрицательных ионов катод — мишень (4) источника был заменен катодом из нержавеющей стали. На рис.4 показаны результаты измерений выхода отрицательных ионов для двух различных материалов катода. Хорошо видно, что использование катода — мишени из нержавеющей стали приводит к значительному (в 7 — 8 раз) уменьшению тока отрицательных ионов.

В ходе экспериментов было обнаружено, что поток положительных ионов разрушает поверхность катода (4), что ухудшает его эмиссионные характеристики. Поэтому для улучшения эксплуатационных характеристик такого источника отрицательных ионов необходимо защитить мишень от попадания на нее положительных ионов. Целесообразно было бы, например, поместить перед мишенью сетку, которая находилась бы под положительным потенциалом.

Влияние сорта газа на величину вытягиваемого пучка отрицательных ионов показано на рис.5. При одинаковых внешних параметрах разряда в качестве рабочего газа использовались  $SF_6$  (кривая 1) и  $CF_4$  (кривая 2), которые образуют отрицательные ионы  $F^-$ . Как видно из рис.5, предпочтительнее использовать шестифтористую серу, так как в этом случае ток вытягиваемого пучка отрицательных ионов в два раза больше.

Экспериментально исследован источник отрицательных ионов на базе отражательного разряда с холодными катодами, работающий на механизме диссоциативного прилипания низкоэнергетичных электронов к молекулам рабочего газа. В качестве системы формирования низкоэнергетичных электронов использован эффект вторичной электронной эмиссии. Применение данного эффекта дает возможность увеличить число медленных электронов по сравнению с числом первичных плазменных электронов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Габович М.Д., Плешивцев Н.В., Семашко Н.Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. -М.: Энергоатомиздат, 1986. -249 с.
- [2] Хирный Ю.М. Источник отрицательных ионов водорода. // ПТЭ. -1958. - №2.-с.51.
- [3] Волков А.М., Калинин Г.П. и др. Плазменный источник ионов. // ПТЭ. - 1988. -№2.-с.122.
- [4] Волков А.М. Плазменный источник ионов. Труды 32-й науч. конф. "Исследования материалов атомных технологий." -М.:ИЯИ, 1987.
- [5] Леунг, Де Бри, Элерс, Диксон Работа пеннинговского источника Дудникова с катодом из лантана бора. // ПНИ. -1987. -№2. -с.68.
- [6] K.N.Leung, K.W.Ehlers, M.Bacal.- Rew. Sci. Instr., 1985, v.54, p.56.
- [7] А.Ориент, А.Чутджиан, С.Аладжаджиан Новый источник пучков отрицательных ионов. // ПНИ.-1985.-№1.-с.78-81.
- [8] И.М.Бронштейн, Б.С.Фрайман Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969, 407с.