

Д.81

17
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

В.Г.Дудников, Г.И.Фиксель

ПОВЕРХНОСТНО - ПЛАЗМЕННЫЙ
ИСТОЧНИК ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ
УСКОРЕННЫХ АТОМОВ

ПРЕПРИНТ 80-44

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
физики СО АН СССР
ИНВ. № _____



Новосибирск

ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК
ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ УСКОРЕННЫХ АТОМОВ

В.Г.Дудников, Г.И.Фиксель

АННОТАЦИЯ

Исследуется эмиссия ускоренных атомов из тлеющих разрядов в водороде с добавлением цезия. Показано, что появление интенсивных потоков ускоренных атомов обусловлено интенсификацией поверхностно-плазменного механизма генерации отрицательных ионов. Для измерения плотности мощности пучка использован импульсный болометр, для регистрации энергетического спектра — перезарядка на цезевой мишени.

Из источника с полупланотронной конфигурацией электродов получен поток атомов водорода с интенсивностью $2,7 \text{ А}$, эмиссионной плотностью 3 А/см^2 , ускоренных до энергии 200 эВ .

Одним из эффективных проявлений поверхностно-плазменного механизма генерации отрицательных ионов в газовом разряде /1,2/ должно быть появление интенсивных потоков ускоренных нейтральных частиц с энергиями в сотни электрон-вольт. В поверхностно-плазменных источниках отрицательные ионы образуются при бомбардировке электродов частицами газоразрядной плазмы за счет захвата электронов из электродов на уровне электронного сродства распыленных и отразившихся частиц. Вероятность ухода частиц с поверхности в виде отрицательных ионов увеличивается в сотни раз при уменьшении работы выхода поверхности за счет адсорбции цезия, подаваемого в разряд. Образовавшиеся отрицательные ионы ускоряются в тонком приэлектродном слое разностью потенциалов между электродом и плазмой. Для уменьшения разрушения отрицательных ионов в поверхностно-плазменных источниках толщина слоя плазмы и газа между эмиттирующей поверхностью электрода и системой формирования пучка тщательно минимизируется. Если же толщина слоя плазмы и газа превышает длину пробега отрицательного иона до разрушения, ускоренные отрицательные ионы теряют лишние электроны и превращаются в поток ускоренных атомов, который может аккумулировать значительную долю мощности, вкладываемой в разряд. Энергия ускоренных атомов определяется разностью потенциалов эмиттирующего электрода и плазмы. В большинстве случаев эмиттирующим электродом служит катод газоразрядного промежутка.

Впервые о непосредственном наблюдении эмиссии ускоренных атомов из разрядов в поверхностно-плазменных источниках с планотронной геометрией газоразрядных ячеек сообщалось в докладе /3/. Ниже приведены результаты более детального исследования этого явления.

Экспериментальные результаты

Исследовалась эмиссия ускоренных атомов из разряда в поверхностно-плазменном источнике с полупланотронной конфигурацией электродов газоразрядной ячейки /4/, схема которого показана на рис.1.

Сильноточный тлеющий разряд зажигается между катодом с прямоугольной канавкой, заглушенной с одного конца, и анодной пластиной, прикрывающей корпус газоразрядной ячейки. В начало канавки подается водород и пары цезия. Регулируемое магнитное поле (~ 500 Э) ориентируется таким образом, чтобы электроны, осциллирующие между стенками канавки катода, дрейфовали в скрещенных полях от начала канавки к ее заглушенному концу. Далее плазма попадает в узкий зазор между анодной пластиной и катодом, в котором не обеспечиваются условия для удержания быстрых электронов, электроны уходят на стенки анода вдоль силовых линий магнитного поля и плазма рекомбинирует.

Длина канавки 40 мм, ширина 8 мм, глубина 3 мм, площадь рабочей части катода $S_k = 5,5 \text{ см}^2$.

В первых экспериментах поток ускоренных атомов выходил через эмиссионную щель в анодной пластине размерами $1 \times 40 \text{ мм}^2$, а в дальнейшем через решетку из 6 щелей шириной 0,7 мм, глубиной 2 мм, занимающую площадь $6 \times 20 \text{ мм}^2$. Суммарная площадь эмиссионных щелей $S_e = 0,84 \text{ см}^2$.

Источник работал в импульсном режиме с полусинусоидальными импульсами тока амплитудой до 100 А, длительностью 1 мсек и частотой следования до 10 Гц. Напряжение на разряде регулировалось изменением подачи цезия. Без подачи цезия оно составляло 600–800 В, при увеличении подачи цезия оно уменьшалось до 200 В. Отметим, что в широком рабочем диапазоне магнитных полей 500–1000 Э отсутствовали наблюдаемые флуктуации параметров разряда. Переход в режим с "шумами" происходил только при дальнейшем увеличении магнитного поля.

Заряженная компонента выходящего из источника пучка заворачивалась магнитным полем и не измерялась. Нейтральная же компонента регистрировалась импульсным болометром, аналогичным описанному в /5/. Фотодиод ФД-10Г регистрирует излучение тонкой (5 микрон) титановой фольги, нагретой постоянным током до 800–1000°К. Импульсный нагрев фольги потоком ускоренных атомов увеличивает поток излучения и, соответственно, ток фотодиода. (Постоянный нагрев фольги введен для смещения спектра импульсного излучения в область чувствительности

фотодиода). Калибровка болометра осуществлялась пропусканием коротких импульсов тока через фольгу. Чувствительность составляла 1 мА/Дж. В качестве дополнительной диагностики использовался вторично-эмиссионный детектор.

Одним из основных вопросов в диагностике нейтральных пучков является измерение энергетического спектра.

Обычные методы ионизации нейтралов электронным или ионным пучком имеют малую эффективность порядка $10^{-5} - 10^{-4}$. Эффективность ионизационной газовой мишени при энергиях сотни электронвольт также мала из-за малых сечений ионизации и сильного рассеяния.

Однако для диагностики нейтральных атомов водорода H_0 можно воспользоваться перезарядкой в отрицательные ионы H^- в цезиевой мишени. Известно /6/, что равновесный выход H^- в цезиевой мишени составляет 15–20% при энергиях ≈ 200 эВ, так что даже на мишенях с сравнительно малой плотностью цезия (для уменьшения рассеяния) можно легко получить выход $\sim 1\%$, что вполне достаточно для целей диагностики.

Схема регистрации энергетического спектра атомов показана на рис.2.

Перезарядная цезиевая мишень имела длину 15 см и диаметр 0,5 см. Мишень сделана по схеме "тепловой трубы" в соответствии с рекомендациями работ /7, 8/, что позволило увеличить срок службы мишени за счет рециркуляции цезия. Образующиеся отрицательные ионы H^- вводятся под углом 45° в плоский анализирующий конденсатор и после отклонения попадают на коллектор. Измеряемый ток усиливается и подается на вход осциллографа. На отклоняющую пластину конденсатора подается треугольный импульс регулируемого напряжения длительностью 30 мкс; он же подается на горизонтальные пластины осциллографа. Анализатор калибровался моноэнергетическим электронным пучком. Измеренное энергетическое уширение совпадало с расчетным и составляло $\Delta E/E \sim 0,1$ по основанию спектра.

На рис.3 показана осциллограмма энергетического спектра отрицательных ионов при напряжении на разряде $U_p = 250$ В. Поскольку сечение перезарядки в области энергий 200–600 эВ

приблизительно постоянно ≈ 6 , а измеренный спектр имеет сравнительно малую ширину, то можно утверждать, что он соответствует истинному энергетическому спектру ускоренных нейтральных атомов.

На рис.4 показана зависимость средней энергии нейтралов $\bar{\epsilon}$ от напряжения на разряде U_p . Видно, что во всем диапазоне напряжений $\bar{\epsilon} < eU_p$. Ширина энергетического спектра составляет ≈ 30 эВ при $U_p = 200$ В и 120–150 эВ при $U_p = 600$ –800 В. Отмечено уширение энергетического спектра при возникновении колебаний напряжения разряда.

По измеренному энергетическому спектру нейтралов и измеренному болометром энергосодержанию пучка можно вычислить ток нейтральных атомов. Амплитудное значение плотности тока нейтральных атомов вычислялось по формуле:

$$\frac{W}{\bar{\epsilon} \tau S_b} \frac{\pi}{2}$$

где W — энергосодержание пучка, зарегистрированное болометром,

τ — время разряда,

S_b — площадь фольги болометра.

Множитель $\pi/2$ возникает при учете временной зависимости.

Относительно этой процедуры необходимо сделать несколько замечаний.

Во-первых, специальными экспериментами было установлено, что основная мощность ($> 90\%$) в нейтральной компоненте действительно находится в нейтральных атомах водорода с энергией в сотни электронвольт. Так при замене водорода на гелий, который не образует отрицательных ионов, сигналы падали в 30 раз, при изменении полярности напряжения в водородном разряде в 400 раз; закрывание выходного окна источника $Li F$ стеклом, прозрачным для ультрафиолета, уменьшало сигнал болометра в 40 раз, а рассеивающей гелиевой мишенью в 10 раз.

Во-вторых, предполагается полное поглощение энергии пучка в болометре, что занижает ток пучка. Из имеющихся в литературе немногочисленных данных по отражению при низких энергиях / 9/ видно, что например, коэффициент отражения энергии от

титана при энергиях водорода 200 эВ достигает 20%.

Распределение плотности тока (нормированное на единицу) в 10 см от источника показано на рис.5. При изменении напряжения разряда распределения изменялись незначительно. Распределения, измеренные болометром и вторично-эмиссионным детектором совпадали, вычисленный коэффициент вторично-электронной эмиссии для энергии атомов 200 эВ составлял 0,2–0,3. Угловая расходимость по полувысоте составляет $\pm 10^\circ$.

Полный ток нейтрального пучка I_0 вычислялся интегрированием плотности тока по пространству. На рис.4 показана зависимость отношения эмиссионной плотности тока нейтрального пучка j_0 к плотности тока разряда на катод j_p от напряжения на разряде (от подачи цезия) при фиксированном токе разряда $I_p = 40$ А. Эмиссионная плотность нейтрального пучка вычислялась как $j_0 = I_0 / S_0$, а плотность тока разряда на катод $j_p = I_p / S_k$. Видно резкое увеличение генерации нейтральных атомов при увеличении подачи цезия в разряд и соответствующем уменьшении напряжения разряда. Аналогичная зависимость генерации отрицательных ионов наблюдается в поверхностно-плазменных источниках / 2/. Довольно значительный разброс данных, особенно при низких напряжениях разряда, объясняется тем, что напряжение разряда вообще говоря не является взаимоднозначной функцией состояния поверхности, от которого очень сильно зависит эффективность генерации отрицательных ионов. Необходимо отметить также, что из-за неоднородности разряда истинное значение плотности тока разряда может отличаться от вычисленного.

На рис.6 изображена зависимость полного тока нейтрального пучка I_0 от тока разряда I_p при фиксированном напряжении разряда $U_p = 200$ В. Отклонение зависимости от линейной на начальном участке неоднократно проверялось. Этот факт может быть объяснен тем, что генерация отрицательных ионов пропорциональна току разряда, а их разрушение на начальном участке также пропорционально току разряда, поэтому $I_0 \propto I_p^2$. Монотонный рост интенсивности при больших токах разряда свидетельствует о сохранении высокой эффективности образования отрицательных ионов.

Результаты данной работы находятся в хорошем согласии с результатами работ по исследованию эффективности генерации отрицательных ионов в поверхностно-плазменных источниках /1,2/. Анализ быстрых нейтралов является весьма полезным средством диагностики для исследования поверхностно-плазменного механизма генерации отрицательных ионов.

ВЫВОДЫ

1. В настоящей работе экспериментально подтверждается возможность эффективной генерации нейтральных атомов водорода с энергией в сотни электронвольт с помощью поверхностно-плазменного метода. Получены потоки атомов водорода интенсивностью до 2,7 А, эмиссионной плотностью 3 А/см², энергией 200 эВ и угловой расходимостью ~10°. Это позволяет надеяться на создание более интенсивных пучков атомов водорода, необходимых для многих приложений, в частности для термоядерных исследований.

2. Отработанная диагностика позволяет надежно регистрировать и анализировать потоки нейтральных атомов. Это является хорошим дополнительным средством для изучения работы поверхностно-плазменных источников отрицательных ионов. Также возможно применение этой диагностики на плазменных установках.

3. Описанный метод открывает возможность для получения ускоренных нейтральных атомов других элементов, образующих отрицательные ионы.

В заключении авторы благодарят Ю.И.Бельченко и Г.В.Рослякова за полезные обсуждения и ценные предложения, а также В.С.Белкина за помощь в работе.

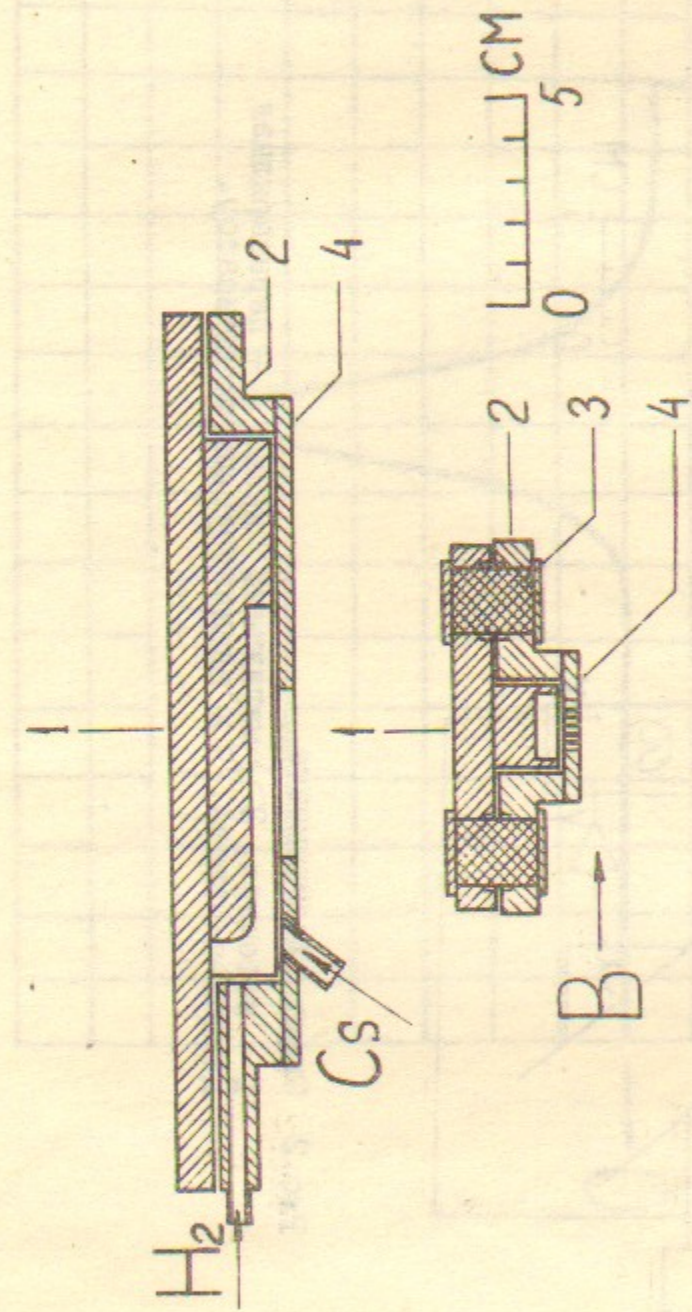


Рис.1 Схема источника
1 - катод, 2 - анод, 3 - керамические изоляторы,
4 - анодная пластина.

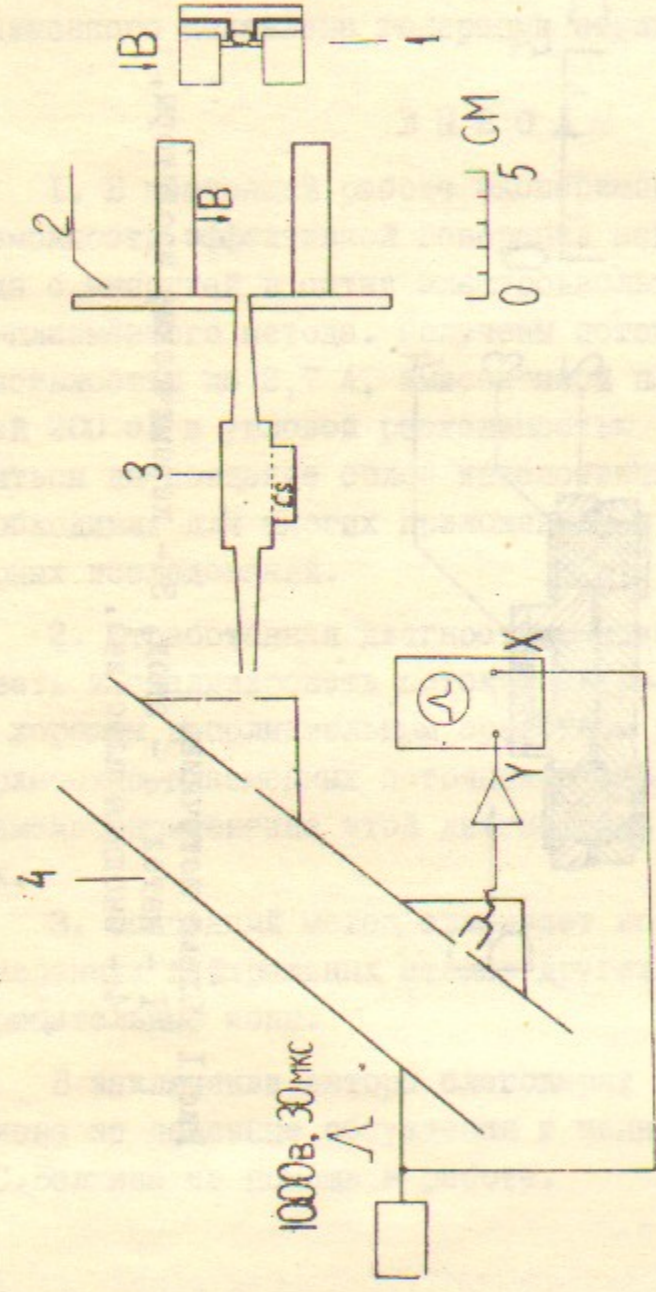


Рис.2 Схема эксперимента

1 - источник, 2 - магнитный экран, 3 - перезарядная цезиевая мишень, 4 - анализирующий конденсатор.

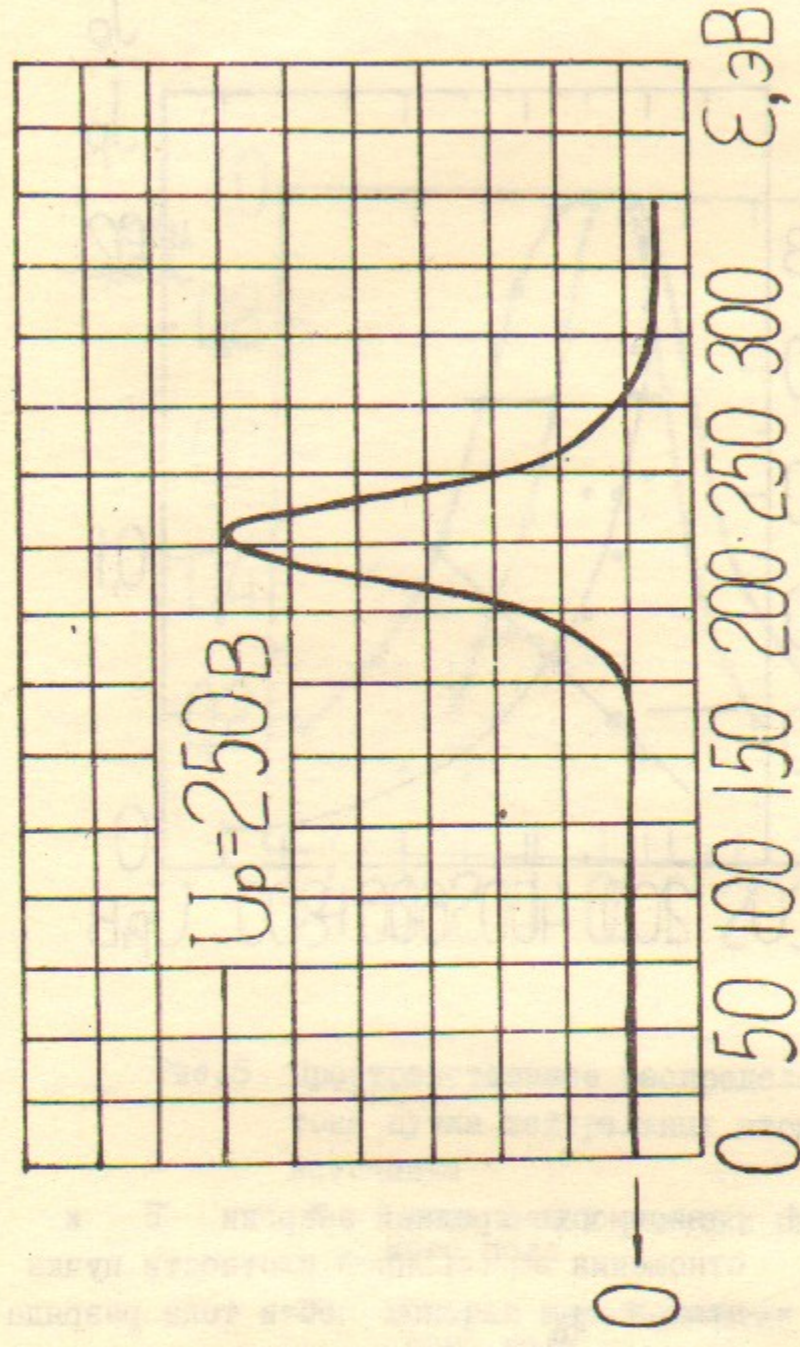


Рис.3 Осциллограмма энергетического спектра атомов.

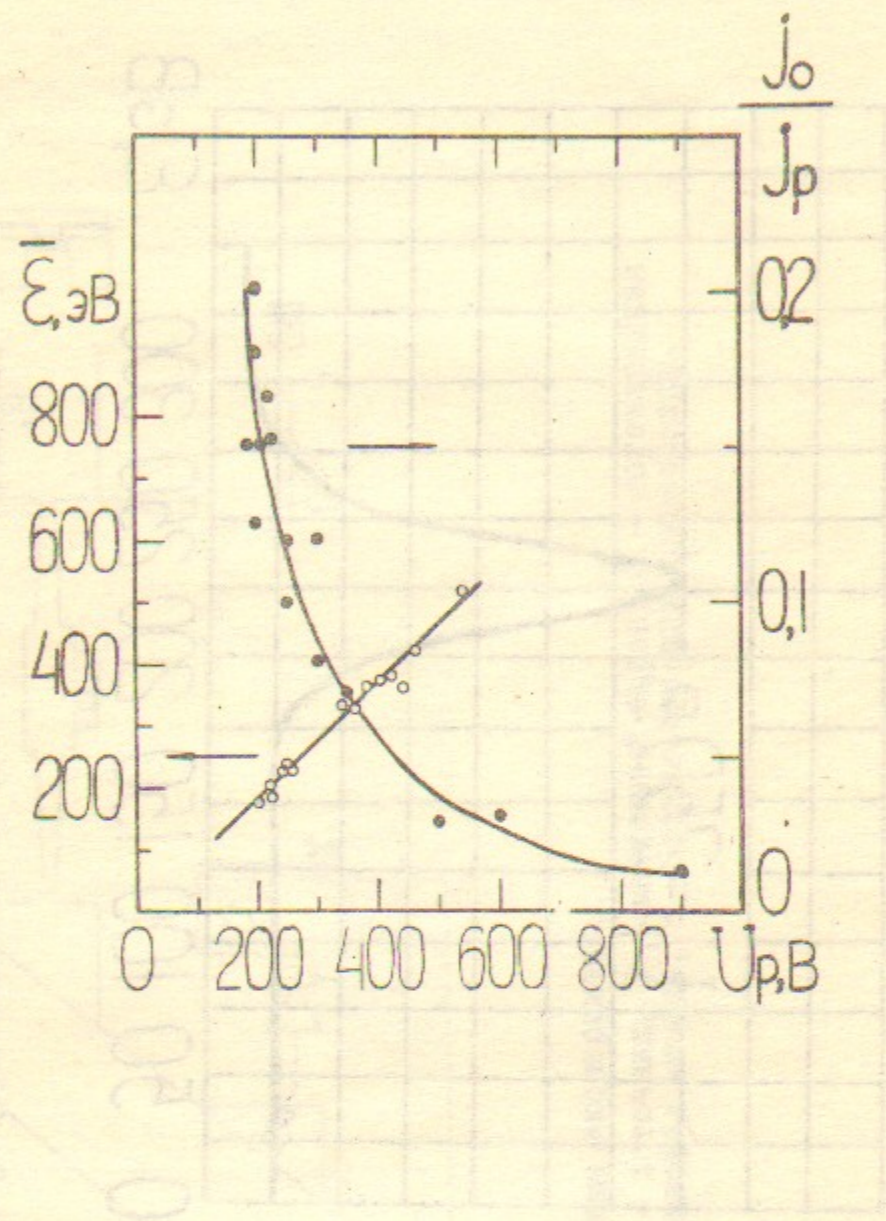


Рис.4 Зависимость средней энергии $\bar{\epsilon}$ и отношения эмиссионной плотности пучка атомов j_0 к плотности тока разряда на катод j_p от напряжения на разряде.

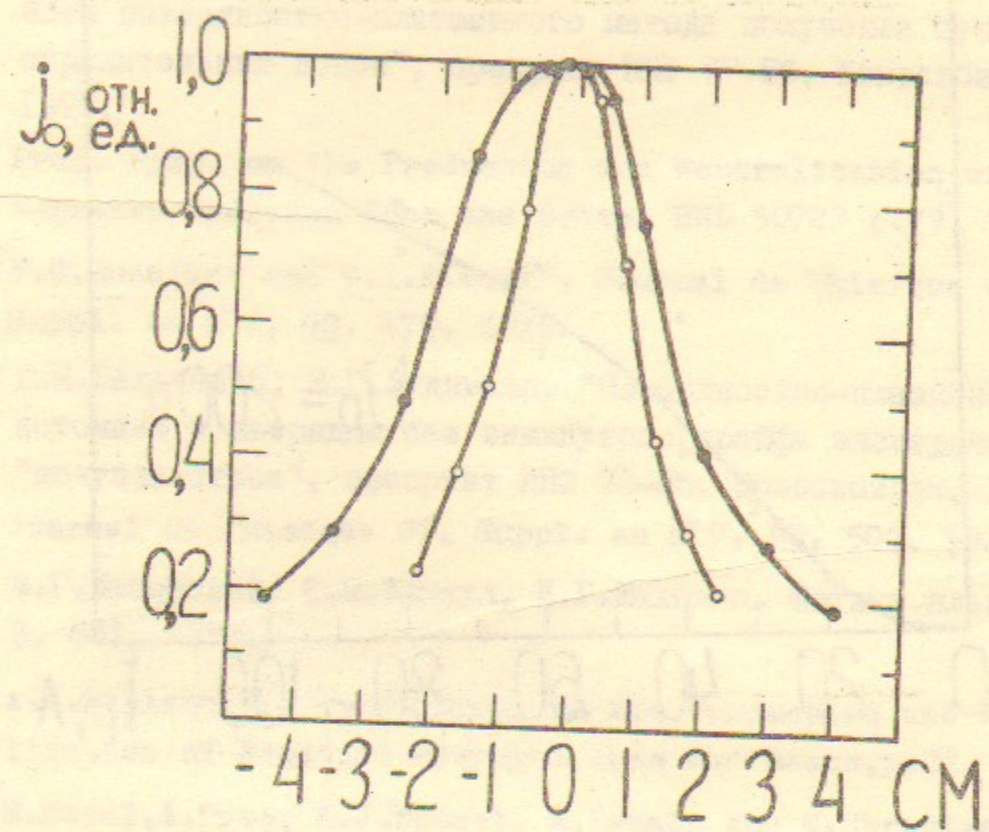


Рис.5 Пространственное распределение плотности тока пучка нейтральных атомов в 10 см от источника

- - вдоль щелей решетки поперек магнитного поля
- - поперек щелей решетки вдоль магнитного поля

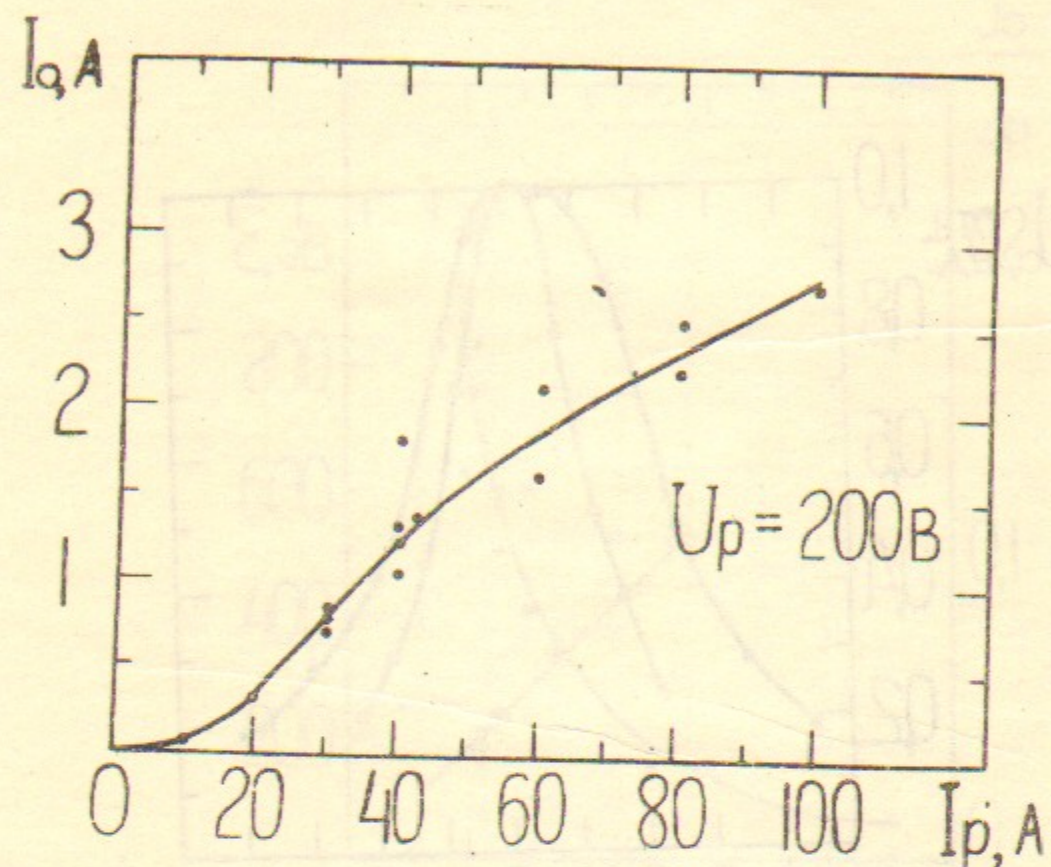


Рис.6 Зависимость полного тока пучка атомов от тока разряда.

Л и т е р а т у р а

- /1./ Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Дудников. Известия АН СССР, серия физич., 37, 2573, 1973.
- /2./ Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Дудников. "Физические основы поверхностно-плазменного метода получения пучков отрицательных ионов", препринт ИЯФ 77-56, Новосибирск, 1977.
Proc. Symp. on the Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ions and Beams, BNL 50727 p.79, 1977.
- /3./ V.G.Dudnikov and G.I.Fiksel', Journal de Physique C7, Suppl. au n° 7, 40, 479, 1979.
- /4./ Ю.И.Бельченко, В.Г.Дудников. "Поверхностно-плазменный источник с разрядом без замкнутого дрейфа электронов - "полупланотрон", препринт ИЯФ. 78-55, Новосибирск, 1978; Journal de Physique C7, Suppl. au n° 7, 40, 501, 1979.
- /5./ М.Г.Каганский, С.И.Лашкул, К.Г.Шаховец. Физика плазмы, 3, 681, 1977.
- /6./ A.S.Schlachter, Proc. Symp. on the Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ions and Beams, p.11, 1977.
- /7./ M.Bacal, A.Trac, H.J.Doucet, H.Lamain and M.Chretien, Nucl. Instr. and Meth., 114, 407, 1974.
- /8./ M.Bacal, W.Reichelt, Rev. Sci. Instrum., 45, 769, 1974.
- /9./ W.Eckstein, F.F.Matschke, H.Verbeek, Int. Conf. Surface Effects in Contr. Fusion Devices p.106, San Francisco, 1976.