

А. 80

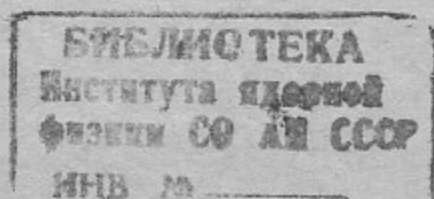
И Н С Т И Т У Т  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ И Я Ф 77 - 93

А.В.Аржанников, А.В.Бурдаков, П.П.Дейчули,

В.С.Койдан, В.В.Конюхов, К.И.Меклер

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ  
ИМПУЛЬСНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО  
ПЕННИНГОВСКОГО РАЗРЯДА МЕТОДОМ  
ДВОЙНОГО ЗОНДА С СВЧ - РАЗВЯЗКОЙ



Новосибирск

1977

+

## I. В в е д е н и е

При постановке различных плазменных экспериментов, например, при исследовании нагрева плазмы продольным током или сильноточным релятивистским электронным пучком возникает необходимость создания достаточно длинного столба предварительной плазмы с плотностью  $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и степенью ионизации  $\sim 100\%$ . Такая плазма может быть получена с помощью импульсного высоковольтного разряда пеннинговского типа, как это сделано на установке "ИНАР" /1/. Микроволновые, корпускулярные и лазерные измерения показали /1-3/, что с помощью этого разряда в продольном магнитном поле  $\sim 15 \text{ кЭ}$  создается столб водородной плазмы длиной  $\sim 2,5 \text{ м}$  при диаметре  $\sim 10 \text{ см}$  с максимальной плотностью  $(3\pm 5) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$  при достаточно высокой степени ионизации (около 90%).

Важными характеристиками такого плазменного столба являются величины плотности и температуры электронов плазмы, а также их распределение в поперечном сечении<sup>1)</sup>. Но измерение локальных значений этих параметров указанными выше способами либо является чрезмерно громоздким, либо вообще не представляется возможным. Для таких измерений удобно использовать хорошо известный метод двойного электрического зонда /5-6/. Однако в разряде указанного типа плазма имеет меняющийся во времени высокий потенциал, что не позволяет применить этот метод в обычном виде. (Наличие высокого потенциала плазмы связано с тем, что на анод разряда относительно катодов, которые находятся под потенциалом "земли", прикладывается напряжение в несколько десятков киловольт).

---

1) Заметим, что получение данных о параметрах плазмы такого пеннинговского разряда представляет не только утилитарный, но и самостоятельный физический интерес, поскольку характеристики такого разряда при больших импульсных токах и сильных магнитных полях до сих пор не исследовались. К настоящему времени исследован лишь разряд такого типа в стационарном режиме при малых величинах анодного напряжения и разрядного тока /4/.



Таким образом, здесь возникает экспериментальная задача измерения параметров нестационарной плазмы, которая находится под высоким потенциалом.

Поскольку зонд имеет непосредственный контакт с плазмой, то он оказывается под высоким потенциалом относительно регистрирующей аппаратуры. Если даже аппаратура оторвана от "земли", то она все же имеет большую емкость относительно неё. В обоих случаях импульсный уравнительный ток от находящейся под высоким потенциалом плазмы через зонд на "землю" даёт не только большие помехи в измерительную цепь, но может даже привести к разрушению зонда. При проведении измерений электрическим зондом в таких условиях необходимо предпринимать специальные меры для подавления этого тока.

Для целей развязки цепей высоковольтного разряда и регистрирующей аппаратуры часто используется разделительный трансформатор (см., напр., /7/). Однако эта система развязки не позволяет в достаточной мере избавиться от влияния ёмкостного тока на измерительную цепь при высокой скорости изменения потенциала плазмы.

В настоящих экспериментах для этой цели оказалось удобным применить с некоторыми изменениями метод бесконтактной передачи сигнала посредством модуляции несущей в СВЧ-диапазоне, предложенный в работе /8/.

Помимо этого, достаточно сильное магнитное поле установки (до 15 кЭ) и высокая плотность плазмы ( $\sim 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) при  $T_e \sim 1 \text{ эВ}$  обусловили другую особенность в применении двойного электрического зонда. При указанных параметрах плазмы легко выполняются условия  $\lambda \gg h$  и  $r_3 \ll r_2$ , где  $\lambda$  — длина свободного пробега заряженных частиц,  $h$  — толщина слоя  $y$  зонда,  $r_2$  — дебаевский радиус,  $r_3$  — радиус зонда. При этих условиях, как известно /9/, интерпретация вольт-амперной характеристики зонда относительно проста. Однако при наличии сильного магнитного поля для корректности зондовых измерений требуется выполнение ещё одного условия, а именно —  $r_3 \ll r_i$ , где  $r_i$  — ларморовский радиус ионов плазмы. Поскольку температура ионов может

быть очень мала ( $\sim 0,05 \text{ эВ}$ ), то это приводит к необходимости использования при указанных магнитных полях сверхтонких зондов с радиусом  $r_3 \ll 10 \text{ мкм}$ . При таких размерах зондов можно вести обработку вольт-амперных характеристик по известным формулам Бома /10/ и Джонсона и Молтера /5/. Применение сверхтонких зондов полезно ещё и в том отношении, что они меньше возмущают плазму.

## 2. Способ создания плазмы и методика измерений

Исследуемая плазма создавалась мощным разрядным током (рис. 1), протекающим между анодным кольцом 4 и катодами 1, 6. Катоды были расположены в пробках магнитного поля (пробочное отношение 1,7) на расстоянии 230 см друг от друга. Диаметр плазменного столба 8 см задавался керамическими диафрагмами (2,5). Диаметр анодного кольца был несколько больше. Импульсный разряд Пеннинга работал следующим образом. Емкость, заряженная до начального напряжения 20 кВ, коммутировалась разрядником на промежутки анод-катоды или непосредственно, или через демпфирующее сопротивление 2 Ом. В отсутствие этого сопротивления разрядный ток имел колебательный характер с периодом 10 мксек и максимальной амплитудой 20 кА. Время полного затухания осциллирующего в плазме тока в этом случае не превышало 70 мксек. При подключении демпфирующего сопротивления ток был аperiodическим, и его продолжительность была не более 20 мксек. Изучение плазмы проводилось в обоих режимах протекания тока. Рабочее давление водорода в вакуумной камере изменялось в пределах от  $4 \cdot 10^{-4}$  до  $2 \cdot 10^{-2}$  рт. ст. Величина напряженности магнитного поля в однородной части варьировалась в диапазоне 1,5-12 кЭ.

Электрический двойной зонд помещался в плазменный столб примерно посредине между анодным кольцом и одним из катодов (см. рис. 1). Его электроды (7) имели цилиндрическую форму и изготавливались из вольфрамовой проволоки диаметром 20 мкм. Проволочки были пропущены через кварцевые капилляры (8) с внешним диаметром 300 мкм так, что длина открытой рабочей поверхности сос-



ставляла 2+3 мм. Расстояние между капиллярами фиксировалось их положением в каналах керамического стержня (9) и составляло около 3 мм. Держатель зонда вакуумно-плотно крепился к отверстию в стеклянной трубке (3). Сильфонный узел держателя позволял перемещать двойной зонд по радиусу плазменного столба без нарушения вакуума. Электроды зонда подключались к схеме регистрации и передачи сигнала (10). Для питания зонда использовался конденсатор  $C = 6$  мкф, заряжаемый от автономного блока питания БП. Напряжение на конденсаторе можно было устанавливать от -25 до +25 В. В цепь каждого из электродов зонда были включены одинаковые измерительные сопротивления ( $R_1 = R_2$ ), с помощью которых регистрировался ток зонда. Сигнал снимался с них симметричным образом и поступал на дифференциальный усилитель. Дифференциальная схема измерения тока зонда позволяла подавлять более чем на порядок паразитные сигналы от разрядного тока, синфазные по обоим входам усилителя. Выход усилителя (токовый) нагружался на СВЧ-детектор  $D_1$ , который выполнял роль модулятора. Схема питания зонда, транзисторный усилитель и СВЧ-детектор были расположены в одном металлическом корпусе небольших размеров. Длина кабеля, соединяющего зонд со схемой питания, была сведена к минимуму. Малогабаритное исполнение всей схемы съёма сигнала с зонда позволило уменьшить паразитную ёмкость на "землю" до 30 пф, что обеспечило подавление ёмкостного тока через зонд до достаточно низкого уровня.

Телеметрическая передача сигнала зонда осуществлялась следующим образом (см. рис. 1). К выходу СВЧ-генератора ГЗ-26 ( $\lambda_{свч} = 3$  см) был подключен двойной волноводный тройник ДТ, в котором происходит разделение СВЧ-мощности. Одна ее часть образует опорный сигнал на детекторе  $D_2$ . Другая часть мощности подается по волноводу с диэлектрическим (фторопластовым) переходом ДВ на модулирующий детектор  $D_1$ . Здесь она отражается промодулированная током детектора, который однозначно связан с током зонда. Отраженный сигнал поступает на детектор  $D_2$ , где происходит смещение его с опорным сигналом. В результате происходит выделение полезного сигнала, несущего информацию о токе зонда.

Коэффициент передачи всей системы, равный отношению сигнала на детекторе  $D_2$  ( $U_{вых}$ ) к его величине на входе усилителя ( $U_{вх}$ ), был равен двум. Амплитудная характеристика передающей системы приведена на рис. 2. Здесь показана лишь правая ветвь характеристики, левая ветвь на линейном участке практически не отличается от правой. Из графика видно, что линейная передача сигнала имеет место до амплитуд на выходе  $U_{вых} \approx 80$  мВ. При уровне помех на детекторе  $D_2$   $\sim 1,0$  мВ передающая система имеет динамический диапазон около двух порядков. В процессе эксперимента передающая система работала в линейном режиме, что достигалось изменением величины измерительных сопротивлений  $R_1 = R_2$  и переключением аттенюатора на входе дифференциального усилителя. Калибровка системы передачи осуществлялась подачей на вход усилителя известного сигнала до и после каждого цикла измерений. В качестве модулирующего и смесительного детекторов в эксперименте использовались полупроводниковые диоды Д-405. Регистрация сигнала осуществлялась осциллографом С1-33.

Диэлектрический волновод ДВ обеспечивал гальваническую развязку между схемой зонда и регистрирующей аппаратурой, причем изоляция по напряжению может быть сделана вплоть до нескольких сот киловольт. Малое затухание в волноводном тракте позволяет удалить принимающий детектор  $D_2$  и СВЧ-генератор от экспериментальной установки на значительное расстояние. В нашем случае генератор с двойным тройником, а также принимающий детектор с измерительным осциллографом находились в экранированной комнате II на расстоянии около 10 м от установки. Это обеспечило дополнительное снижение уровня электромагнитных помех и позволило вести измерения при максимальной чувствительности осциллографа (10 мВ/см).

### 3. Результаты измерений и их обсуждение

Основные измерения были проведены в магнитном поле 6 и 12 кЭ при давлении водорода в разрядной камере  $(2+6) \cdot 10^{-3}$  мм рт.ст. На рис. 3 представлена типичная осциллограмма сигнала двойного электрического зонда для случая аperiодического разрядного то-



ка. Как видно из осциллограммы максимум плотности достигается за время  $\sim 20$  мксек после начала протекания тока. В случае колебательного режима определение параметров плазмы по сигналу с двойного зонда можно вести лишь спустя  $\sim 70$  мксек после начала разряда из-за наличия осциллирующей помехи во время протекания разрядного тока.

Вольт-амперные характеристики зонда снимались по точкам при различных значениях напряжения между электродами зонда на обеих полярностях. Характеристики оказались симметричными относительно смены полярности напряжения. На рис. 4 представлены вольт-амперные характеристики двойного электрического зонда для колебательного режима разряда в магнитном поле 6 кЭ (показаны положительные ветви). Эти характеристики относятся соответственно к моментам времени 70 мксек (верхняя) и 250 мксек (нижняя) после начала разряда. Экспериментальные точки получены усреднением по 5-ти измерениям при каждом значении напряжения между электродами зонда. Из графика видно, что вначале с увеличением напряжения ток зонда растёт линейно, а затем выходит на насыщение. Для верхней кривой это происходит при напряжении  $\sim 4$  В, а для нижней - при  $\sim 1,5$  В. При дальнейшем увеличении напряжения вплоть до максимального значения  $\sim 25$  В ток зонда возрастает незначительно. Из этих характеристик были определены температура электронов и плотность плазмы. Значения электронной температуры оказались для 70 и 250 мксек соответственно равными 1,8 и 0,6 эВ, а плотность плазмы -  $(3 \text{ и } 0,9) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Отметим, что метод томсоновского рассеяния света рубинового лазера на угол  $90^\circ$  в этом режиме разряда для задержки 350 мксек относительно начала тока даёт величину электронной температуры около 0,5 эВ /2/.

На рис. 5 представлено измеренное распределение плотности плазмы по радиусу плазменного столба для момента времени 70 мксек после начала протекания разрядного тока. Установлено, что плотность плазмы слабо меняется по сечению в пределах  $R \leq 4$  см и резко спадает вне диафрагмируемого размера плазмен-

ного столба. Регистрация плазмоскопом<sup>2)</sup> распределения плотности плазмы по сечению столба также свидетельствует о хорошей её однородности в этом режиме разряда (см. рис. 6). Заметим, что в последующие моменты времени ( $t > 70$  мксек) однородность плазмы внутри диафрагмируемого размера ( $R \leq 4$  см) только улучшается.

Измерение плотности плазмы по ослаблению нейтрального водородного пучка /3/ даёт для момента времени 70 мксек среднюю концентрацию в расчете на диаметр 8 см  $(3+3,5) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , что находится в хорошем согласии с приведенными выше результатами. Следует отметить, что и для последующих моментов времени 170 и 250 мксек после начала разряда, двойной зонд показывает плотность в центре соответственно  $1,7 \cdot 10^{14}$  и  $0,9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , что близко к средней плотности, измеряемой по ослаблению водородного пучка. Показания двойного зонда совпадают также с результатами измерений плотности плазмы по методу отсечки СВЧ-сигнала на длинах волн 0,4 и 0,8 см.

Кроме того проводилось сопоставление результатов измерений зондами с различными диаметрами электродов в магнитном поле 12 кЭ при одинаковых условиях разряда. Установлено, что плотность тока на электроды диаметром 4 и 20 мкм различаются не более чем на 15% (уровень нашей экспериментальной точности), в то время как на зонд с электродами  $\phi 300$  мкм эта величина в три раза ниже. По-видимому, это обусловлено тем, что для "толстого" зонда ( $\phi 300$  мкм) уже сказывается замагниченность ионов, ларморовский радиус которых в этом случае может быть в несколько раз меньше радиуса его электродов.

Были проведены измерения плотности плазмы в разряде Пеннинга в зависимости от начального давления водорода при изменении его в пределах  $10^{-4} + 10^{-2}$  мм рт.ст. Полученная зависимость плотности в центре столба в момент окончания разрядного тока ( $t = 70$  мсек) от давления водорода в камере представлена на рис. 7. Из графика видно, что максимальная плотность  $(6+7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3})$  достигается при давлении водорода  $P_{H_2} \approx 10^{-2}$  мм рт.ст.

<sup>2)</sup> Плазмоскоп, аналогичный описанному в /11/, устанавливался вместо одного из катодов пеннинговского разряда.



При более высоких давлениях водорода наблюдается резкий спад плотности плазмы. Регистрация плазмоскопом распределения плотности плазмы по сечению разрядного столба свидетельствует о появлении неоднородности концентрации при  $P_{H_2} > 1 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст. Это проявляется и на осциллограмме сигнала двойного зонда, который в этом случае уже имеет немонотонный характер спада во времени. Немонотонность спада видимо связана с приходом на силовую трубку магнитного поля, на которой находится зонд, плазмы с более высокой концентрацией из другой точки в сечении столба. Неоднородность плазмы при высоком давлении, по-видимому, обусловлена тем, что в этом случае пробег электронов относительно ионизации водорода становится существенно меньше длины разрядной камеры, и разрядный промежуток пробивается в виде отдельных каналов.

При снижении давления водорода в камере от  $1 \cdot 10^{-2}$  до  $4 \cdot 10^{-4}$  мм.рт.ст. наблюдается уменьшение концентрации плазмы от  $7 \cdot 10^{14}$  до  $5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Причем при давлениях газа  $P_{H_2} \approx 10^{-3}$  мм рт.ст. плотность плазмы оказывается несколько выше исходной плотности атомов водорода, которая определяется величиной давления в камере. Такое превышение может быть объяснено поступлением в разряд водорода из зазора между плазменным столбом ( $\phi$  8 см) и вакуумной камерой ( $\phi$  10,5 см), а также десорбцией газа со стенки камеры под действием излучения плазмы. Молекулы водорода, даже с комнатной температурой, могут достигнуть центра разрядной камеры за время  $t \approx 30$  мксек, так что в течение времени протекания разрядного тока ( $t = 70$  мксек) газ успеет не только проникнуть в плазменный столб, но и ионизоваться.

При более низких давлениях газа ( $P_{H_2} < 10^{-3}$  мм рт.ст.) наблюдается запаздывание развития разряда относительно момента подачи напряжения: появление разрядного тока смещается на  $10 \pm 50$  мксек. Двойной зонд в том случае регистрирует запаздывание появления плазмы.

#### 4. Заключение

Применение сверхтонкого двойного электрического зонда с телеметрической системой передачи сигнала позволило измерить

локальные значения температуры электронов и плотности плазмы в импульсном высоковольтном разряде Пеннинга.

Сравнением с другими методами измерений показано, что с помощью двойного зонда при диаметре электродов  $d \leq 20$  мкм можно корректно определить температуру и концентрацию электронов плазмы в магнитном поле  $\sim 10$  кЭ. Зарегистрировано снижение тока насыщения двойного зонда по отношению к значению, даваемому формулой Бома, в случае, когда радиус его электродов становится больше ларморовского радиуса ионов.

Экспериментально установлено, что высоковольтный пеннинговский разряд позволяет формировать в магнитном поле напряженностью  $\sim 10$  кЭ однородный по сечению столб плазмы плотностью до  $6 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, длиной более двух метров при диаметре около 10 см. Определены границы давления водорода ( $10^{-3} + 10^{-2}$  мм рт.ст.), при котором реализуется устойчивое горение такого разряда.

Авторы выражают благодарность А.И.Рогозину за полезные обсуждения.



## Л и т е р а т у р а

1. Ю.И.Абрамитов, В.С.Койдан, В.В.Конюхов, В.М.Лагунов, В.Н.Лукьянов, К.И.Меклер, Д.Д.Рютов, *ЖЭТФ*, **66**, 1324, 1974.
2. А.В.Аржанников, Б.Н.Брейзман, Л.Н.Вячеславов, В.С.Койдан, В.В.Конюхов, Д.Д.Рютов, *Plasma Physics and Contr. Nucl. Fusion Research*, **3**, 257, 1975.
3. В.С.Койдан, А.И.Рогозин, *ЖЭТФ*, **71**, 1837, 1976.
4. В.Л.Грановский. *Электрический ток в газе. Установившийся ток*. М., "Наука", 1971.
5. E.O.Johnson, L.Malter, *Phys.Rev.*, **80**, 58, 1950.
6. Л.М.Биберман, Б.Панин, *ЖТФ*, **21**, 12, 1951.
7. И.А.Кован, Ю.Л.Москвин, В.Д.Русанов, В.П.Смирнов. В сборнике "Диагностика плазмы", Госатомиздат, 1963, стр.237.
8. В.Н.Пильский, Ю.Н.Сердюк, *ПТЭ*, № 4, 130, 1971.
9. О.В.Козлов. *Электрический зонд в плазме*. М., Госатомиздат, 1969.
10. D.Bohm. In the book "The characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields". Ed. by Q.Gurthrie, R.Wakerling, N.Y., 1949.
11. E.I.Dobrokhotov, A.V.Zharinov, I.N.Moskalev, D.P.Petrov, *Nuclear Fusion*, **9**, 143, 1969.

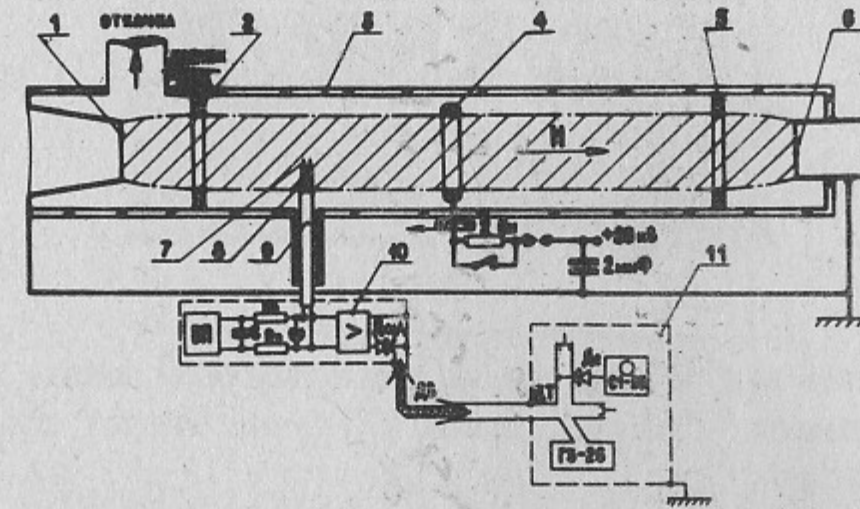


Рис.1. Схема эксперимента: 1,6 - катоды пеннинговского разряда; 2,5 - керамические диафрагмы; 3 - стеклянная труба; 4 - анодное кольцо; 7 - вольфрамовый электрод зонда; 8 - кварцевый капилляр; 9 - керамический стержень; 10 - схема регистрации и передачи зондового сигнала; 11 - схема приема сигнала в экранированной комнате.

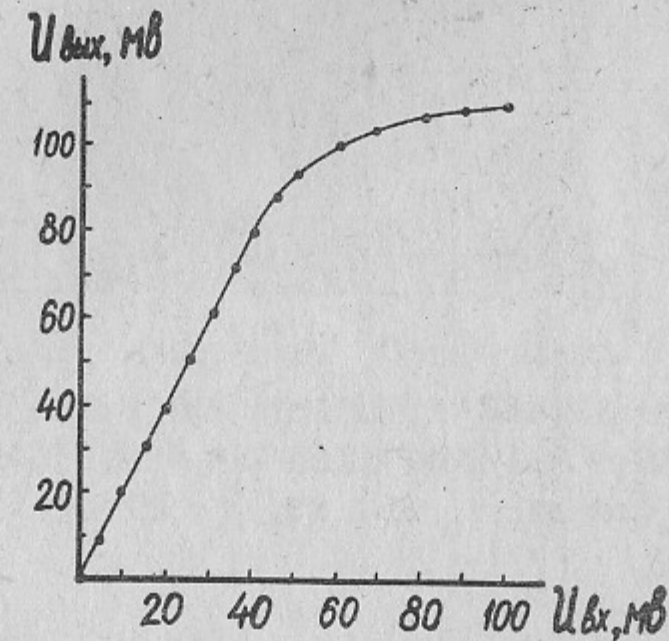


Рис.2. Амплитудная характеристика передающей СВЧ-системы. 13



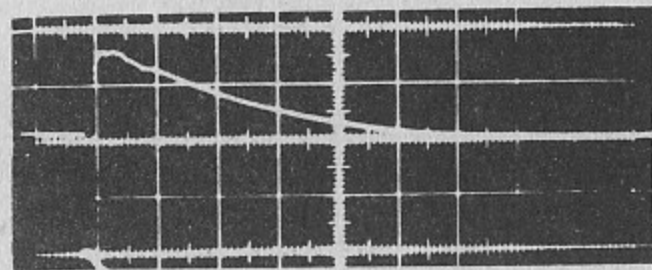


Рис. 3. Типичная осциллограмма тока двойного зонда. Зонд: диаметр - 20 мкм, длина - 2,5 мм. Разряд аperiодический:  $P_{N_2} = 3 \cdot 10^{-3}$  мм рт.ст.,  $N = 12$  кЭ,  $U = 20$  кВ. Развертка - 100 мксек/дел.

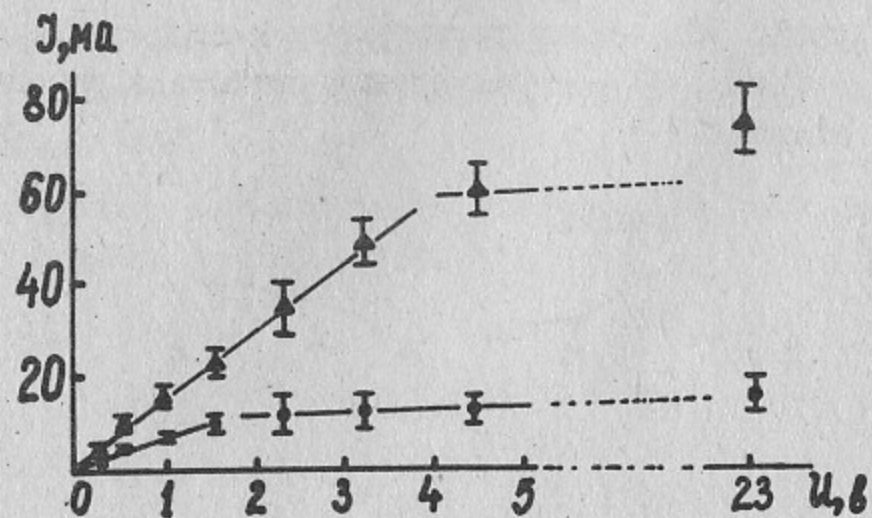


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики двойного зонда. Зонд: диаметр - 20 мкм, длина - 2,5 мм. Разряд:  $P_{N_2} = 3 \cdot 10^{-3}$  мм рт.ст.,  $N = 6$  кЭ,  $U = 20$  кВ.

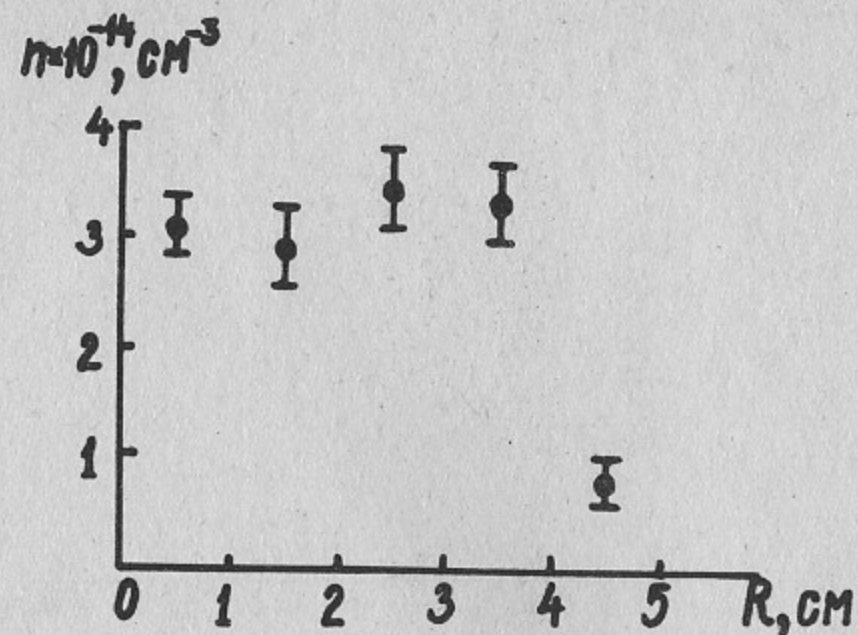


Рис. 5. Распределение плотности по радиусу разрядного столба. Разряд колебательный:  $P_{N_2} = 3 \cdot 10^{-3}$  мм рт.ст.,  $N = 12$  кЭ,  $U = 20$  кВ.

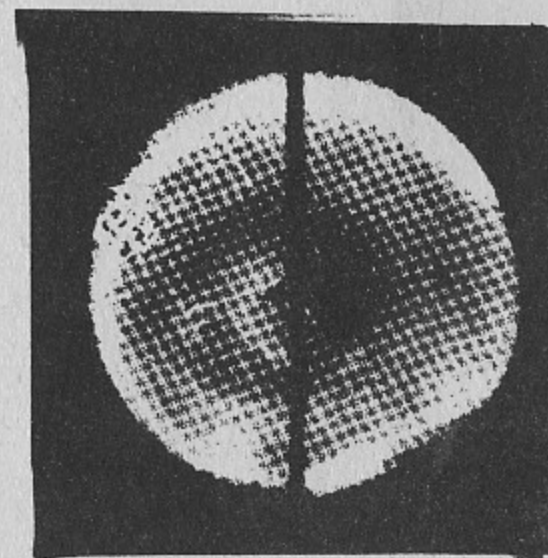


Рис. 6. Плазмограмма поперечного сечения плазмы пеннинговского разряда (темная полоса на плазмограмме - тень от металлической маски, установленной перед первой сеткой).



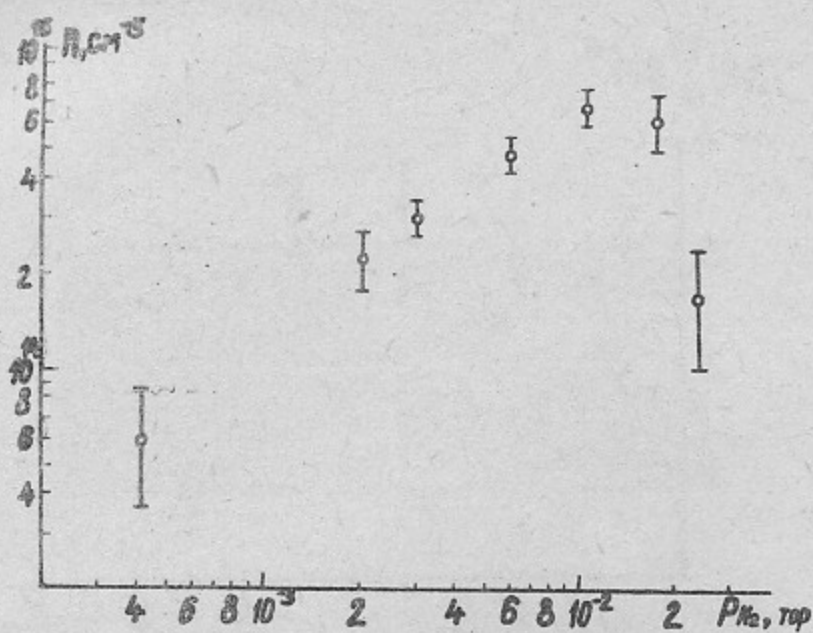


Рис.7. Зависимость плотности плазмы от начального давления водорода.  $N=12$  кЭ,  $U = 20$  кВ.

Работа поступила - 19 мая 1977 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ  
 Подписано к печати 3.IX-1977 г. МН 03013  
 Усл. 0,9 печ.л., 0,8 учетно-изд.л.  
 Тираж 200 экз. Бесплатно  
 Заказ № 93.

Отпечатано на ротапринтере ИЯФ СО АН СССР