

Е. П. Велихов, В. П. Глушко, А. Н. Гордов, В. Е. Дорощук,  
 В. А. Кириллин, О. А. Кремнев, Г. И. Петров, Б. С. Петухов  
 (зам. главного редактора), А. С. Предводителев, Р. З. Сагдеев,  
 В. И. Субботин, А. Е. Шейндлин (главный редактор),  
 Э. Э. Шпильрайн

Зав. редакцией М. Ф. Остроухова

Адрес редакции:  
 Москва, Е-250, Красноказарменная ул., 17  
 корпус 2

№ 6, ноябрь — декабрь

Том 2

«АУКА»

Физики СО АН СССР  
 Инв. № 5485/н

УДК 533.9.07

## СКОРОСТНАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ

Р. Х. Куртмуллаев, Ю. Е. Нестерихин, В. И. Пильский,  
 А. Г. Пономаренко

Описан скоростной микроволновой интерферометр для диагностики плазмы. Приводятся некоторые результаты исследования плазменных струй с помощью описанного интерферометра.

### Введение

Методы диагностики нестационарной плазмы, плазменных струй, сгустков и т. д., использующие микроволновую технику, в настоящее время относятся к числу наиболее распространенных и надежных. Достоинством этих методов, как известно, является возможность измерения основных параметров плазмы (плотность, проводимость, скорость движения границ и др.) без возмущающего воздействия на сам процесс. Существенным является также свойство волноводных линий передач полностью подавлять помехи с частотами, ниже рабочей.

В литературе описан ряд схем микроволновой диагностики, большинство из которых обнаруживают ограничения при исследованиях плотных плазм и быстрых процессов [1—4].

Настоящая работа посвящена второй возникающей при этом проблеме — созданию скоростной регистрирующей системы. Ниже описан быстродействующий микроволновой интерферометр со следующими параметрами:

Диапазон  $\lambda = 8$  мм.

Разрешающая способность  $3 \cdot 10^{-8}$  сек.

Максимальная скорость изменения фазы  $(d\varphi/dt)_{\max} = \pm 6\pi$  рад · мксек<sup>-1</sup>.

Диапазон разверток  $T = (3 \div 100)$  мксек.

Точность отсчета фазы  $\lesssim 5^\circ$  и не зависит от диапазона разверток.

Предельный диапазон изменения фазы  $(d\varphi/dt)_{\max} T_{\max} = 6 \cdot 10^2$  π рад.

Этот диапазон в действительности ограничен шириной луча электронно-лучевой трубки и разрешающей способностью фотопленки и составляет  $\sim 50$  π рад.

На экране индикатора изображается фазовая кривая в полярной системе координат с рабочей областью  $R = (5 \div 10)$  см;  $\alpha = (0 \div 2\pi)$  рад.

### Описание схемы интерферометра

Принцип работы интерферометра заключается в измерении фазового сдвига зондирующей волны с использованием преобразования частоты  $\nu = 3,7 \cdot 10^{10}$  гц к промежуточной  $F = 30$  Мгц по супергетеродинной схеме и последующим сравнением фазы последней с фазой опорной частоты  $\nu_0 = 30$  Мгц на индикаторе, представляющем собой электронно-лучевую трубку со спиральной разверткой. Кроме того, в схеме предусмотрена

регистрация мощности отраженной и прошедшей волн синхронно с их фазами.

Блок-схема интерферометра представлена на рис. 1. Штриховыми линиями здесь выделены высокочастотная часть, приемник и индикатор.

Источник зондирующего сигнала (КГ) представляет собой стандартный генератор промышленного образца. Для осуществления супергетеродинной схемы клистрон ( $f_0 = 3,7 \cdot 10^{10}$  гц) модулируется по отражателю напряже-

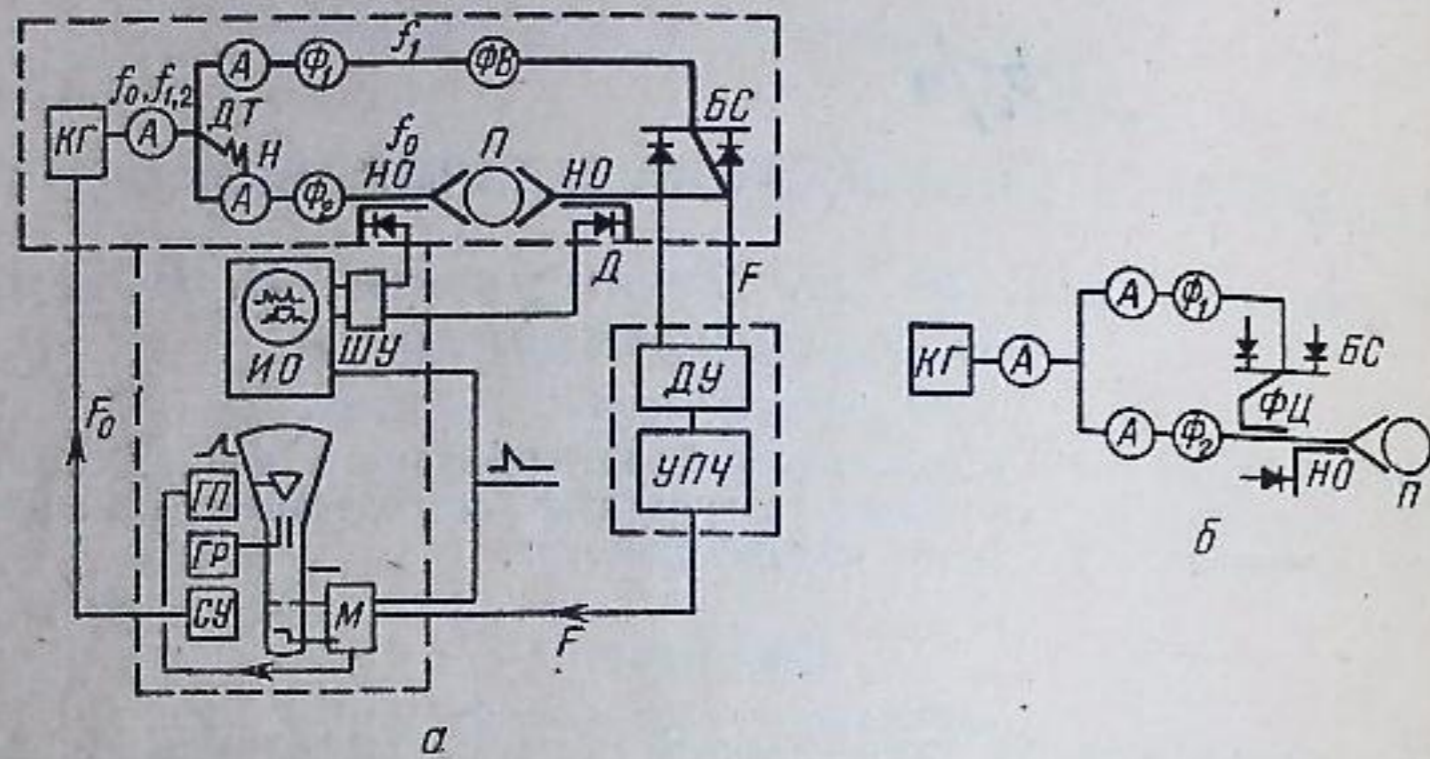


Рис. 1. Блок-схема микроволнового интерферометра

нием с частотой  $F_0 = 30$  Мгц, которое поступает из индикаторного блока. Режим модуляции выбирается таким, что в спектре присутствуют частоты  $f_0, f_{1,2} = f_0 \pm F_0$ , причем амплитуды основной  $f_0$  и одной боковой  $f_1$  частот устанавливаются сравнимыми.

Мощность клистрона при помощи согласованного двойного тройника (ДТ) разделяется по двум каналам: рабочему и опорному; установленные здесь резонансные фильтры  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  [ $2\Delta f_1 = (10 \div 15)$  Мгц] пропускают частоты  $f_1$  и  $f_2$ , соответственно. Первоначальная настройка режима модуляции и резонансных фильтров, а также контроль в процессе эксплуатации проводятся по спектр-анализатору.

Часть мощности, отраженная от фильтров, поглощается в согласованной нагрузке (Н) тройника и аттенюаторах (А) (весьма желательно вместо последних установить ферритовые вентили). Сигнал частоты  $f_0$ , прошедший через плазму (П) смешивается с «гетеродинным» сигналом частоты  $f_1$  в балансном смесителе (БС), собранном на двойном тройнике. Выделяющиеся на смесительных диодах напряжения имеют вид

$$U_1 = U_{01} \cos(2\pi Ft + \varphi(t)), \quad U_2 = U_{02} \cos(2\pi Ft + \varphi(t) + \pi).$$

Мгновенное значение фазового сдвига  $\varphi(t)$ , приобретенного зондирующим лучом, имеет вид

$$\varphi(t) = 2\pi \frac{l}{\lambda} \left( 1 - \frac{1}{l} \int_0^l \sqrt{\varepsilon(x, t)} dx \right),$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая постоянная плазмы;  $l$  — ее размер вдоль направления зондирования.

Напряжения  $U_1$  и  $U_2$  поступают на вход приемного блока, состоящего из дифференциального усилителя (ДУ) и усилителя промежуточной частоты (УПЧ). Общее усиление приемника  $\sim 10^5$ , собственные шумы, пересчитанные на вход,  $\sim 1,7$  мкв, полоса  $(30 \pm 5)$  Мгц.

Индикаторный блок, в котором выделяется функция  $\varphi(t)$ , изготовлен на базе осциллографа ОК-15 с электронно-лучевой трубкой 23Л051А (использованы кожух и блок питания).

Развертка осциллографа в виде свертывающейся внутрь архимедовой спирали создается комбинацией напряжений, снимаемых с генератора

круговой развертки и генератора пилообразного напряжения. Напряжение круговой развертки ( $F_p = 15$  Мгц,  $U_p = 2500$  в), симметричное относительно земли, подается на одну пару отклоняющих пластин электронно-лучевой трубки. Другая пара пластин включена в пассивный контур с резонансной частотой 15 Мгц, слабо связанный с выходным контуром генератора развертки. Добротность пассивного контура и емкость связи выбираются так, чтобы обеспечивать необходимую амплитуду и фазовый сдвиг ( $\pi/2$ ) напряжения на второй паре пластин.

Пилообразное напряжение с амплитудой 1500 в длительностью 3—100 мксек и весьма малым коэффициентом нелинейности подается на анодный электрод трубки.

Формирование импульса подсвета осуществляется на модуляторе. Сигнал промежуточной частоты, поступающий из приемника и несущий фазовый сдвиг ( $U \approx 1$  в,  $F = 30$  Мгц), преобразуется здесь в пакет импульсов напряжением порядка 100 в, длительностью  $(3 \div 4) \cdot 10^{-9}$  сек и частотой повторения 30 Мгц. Длительность всего пакета определяется длительностью исследуемого процесса и регулируется в пределах 3—100 мксек. Импульсы подсвета с анода и динода лампы 6В2П оконечного каскада модулятора поступают соответственно на катод и управляющий электрод трубки. С модулятора поступает также запускающий импульс на генератор пилообразного напряжения.

В индикаторном блоке размещена схема удвоения, которая выдает на клистрон модулирующее напряжение, представляющее собой вторую гармонику ( $F = 30$  Мгц) частоты развертки  $F_p = 15$  Мгц.

Таким образом, за один оборот луча по кругу ( $F_p = 15$  Мгц) импульс подсвета дважды ( $F = 30$  Мгц) высвечивает узкий сектор окружности. При отсутствии исследуемого процесса ( $\varphi = \text{const}$ ) при развертывании луча по спирали подсвеченные участки располагаются вдоль диаметра окружности. В рабочем положении яркость луча подбирается такой, что на экране остается только эта линия. Последняя представляет собой не что иное, как функцию  $\varphi(t)$  в полярной системе координат, где время отсчитывается по радиусу от периферии к центру по секторным меткам или калиброванной радиальной развертке, а фазовый сдвиг — непосредственно в градусах с множителем 2.

В рабочем плече схемы (рис. 1) перед излучающим и после приемного рупоров установлены направленные ответвители (НО), при помощи которых регистрируются мощности отраженного и прошедшего сигналов ( $P_{\text{отр}}$  и  $P_{\text{пр}}$ ). Напряжения, выделяющиеся на видеодетекторах (Д), поступают на вход импульсного осциллографа ОК-17 (ИО) через широкополосный усилитель ( $F = 10$  Мгц) двухканальный усилитель (ШУ).

Запуск системы осуществляется внешним импульсом, поступающим на модулятор индикаторного блока и осциллограф ОК-17.

Описанная схема может быть использована и для непрерывной регистрации положения границы плазмы (слоя с плотностью  $N$  выше критической  $N_{\text{кр}}$ ). В этом случае оба рупора располагаются по одну сторону от исследуемого объема так, что приемный рупор ориентирован на отраженный луч и отсутствует связь между рупорами. Предпочтительней для этой цели использование ферритового циркулятора (ФЦ, рис. 1, б).

### Некоторые результаты исследования плазменных струй при помощи микроволнового интерферометра

При определенных условиях эксперимента, когда плазменный объем достаточно хорошо удовлетворяет приближению плоского слоя (т. е. эффекты рассеяния, дифракции и др. пренебрежимы), полученные при помощи описанного устройства величины  $\varphi(t)$ ,  $P_{\text{пр}}(t)$ ,  $P_{\text{отр}}(t)$  достаточны для расчета ряда параметров плазмы: средних значений плотности  $N_{\text{ср}}$

проводимости  $\sigma$ , эффективной частоты столкновений электронов  $\nu_{эф}$ , оценки пространственного распределения плотности, а также для установления геометрии плазмоида и закона движения его границ.

При помощи описанной аппаратуры были исследованы плазменные струи, создаваемые коническими источниками [5]. Рабочее плечо интер-

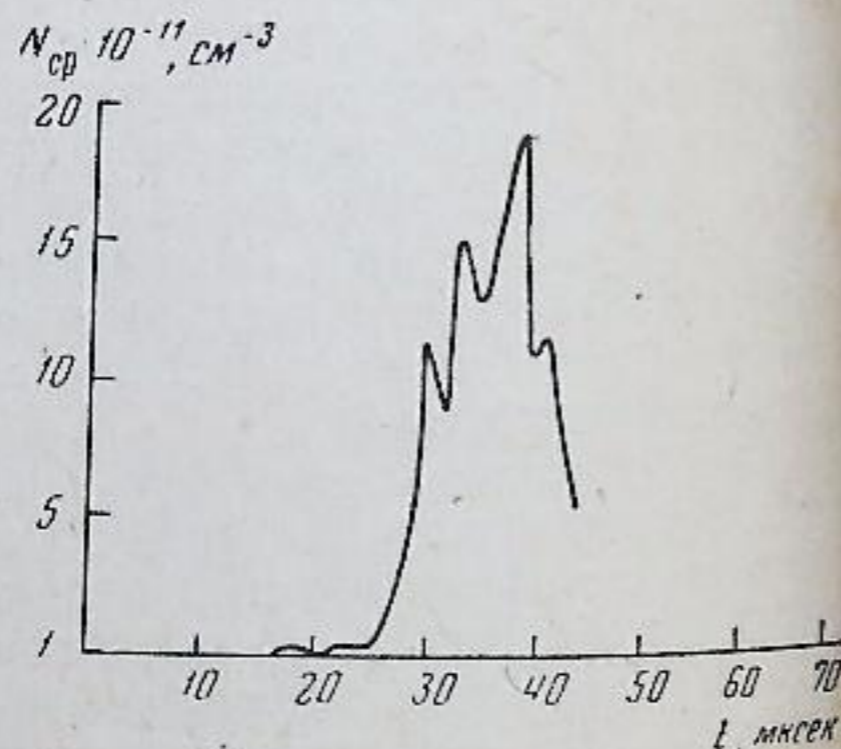
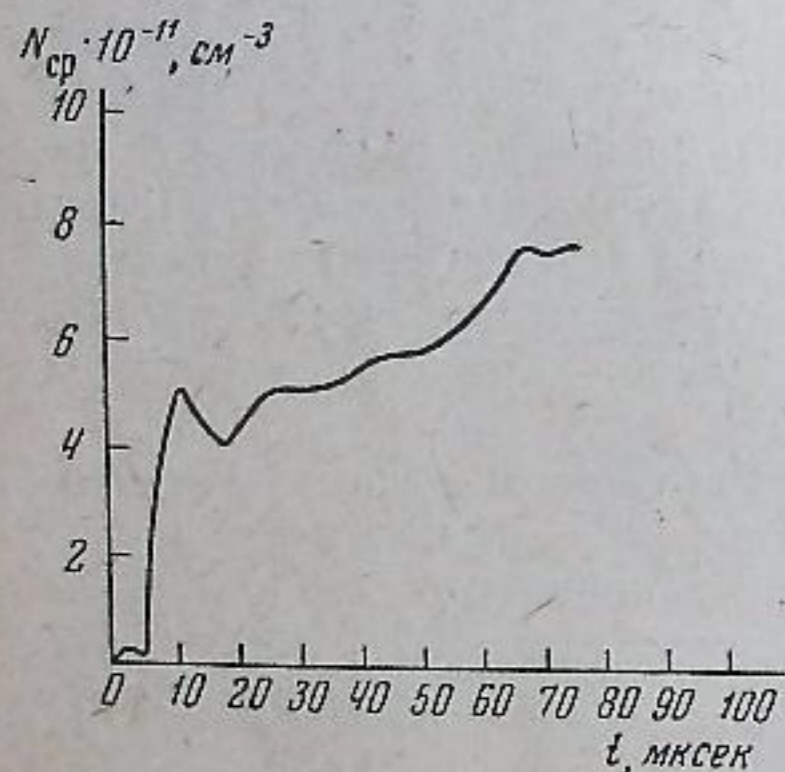
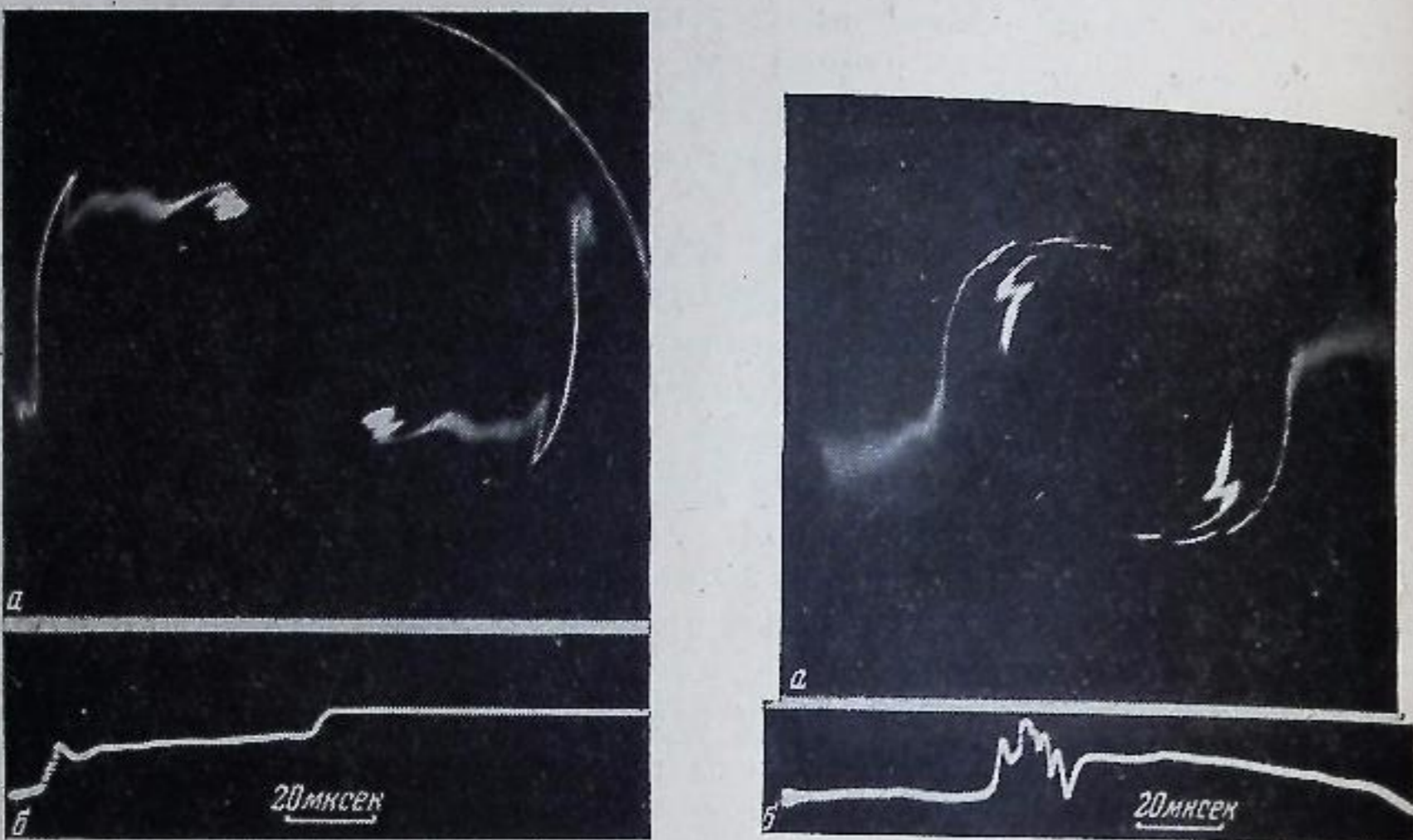


Рис. 2. Зондирование плазменной струи:

а — фазовый сдвиг зондирующей волны; б — относительное затухание зондирующей волны; в — профиль плотности плазмы в струе, найденный по осциллограмме а. Слева — напряжение на источнике  $U = 2,5$  кВ; справа —  $U = 2$  кВ

ферометра располагалось перпендикулярно к оси трубы, вдоль которой двигались плазменные струи. Диаметр трубы и плазмоида были около 12λ.

На рис. 2 приведены полученные осциллограммы фазового сдвига и затухания прошедшего сигнала для двух значений напряжения на коническом источнике, а также графики распределения средней плотности плазмы вдоль длины передней части сгустка, вычисленные в приближении

$$\varphi(t) = 2\pi \frac{l}{\lambda} (1 - \sqrt{\epsilon_{cp}(t)}); \quad \epsilon_{cp} = 1 - \frac{N_{cp}}{N_{кр}},$$

где  $l$  — размер плазмы вдоль зондирующего луча;  $N_{кр} = 1,7 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> (для  $\lambda = 8$  мм).

Средние значения  $\sigma_{вч}$  и  $\nu_{эф}$  находятся согласно [6]:

$$P_{пр}(t) = P_0 \exp(-\mu(t)l), \quad \sigma_{вч} = \mu \frac{c\sqrt{\epsilon}}{4\pi}, \quad \nu_{эф} = \mu \frac{c\sqrt{\epsilon} N_{кр}}{N_{cp}}$$

где  $P_0$  — мощность в зондирующем луче;  $\mu$  — коэффициент поглощения;  $c$  — скорость света. (Выше были использованы условия  $\epsilon \gg 4\pi\sigma/\omega$ ,  $\omega = 2\pi f \gg \nu_{эф}$ , которые соблюдались в эксперименте.)

Как показал расчет [5], значения  $\sigma_{вч}$  и  $\nu_{эф}$  меняются не очень сильно вдоль передней части плазмоида и имеют порядок

$$\sigma_{вч} \approx 10^8 \text{ CGSE}; \quad \nu_{эф} \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1}.$$

Проведенные измерения дали возможность определить характер распределения плотности плазмы по радиусу трубы. При этом было использовано то обстоятельство, что описанная схема в момент записывания зондирующего луча наряду со средним значением плотности  $N_{cp}$  фиксирует максимальное значение плотности в данном сечении плазмоида  $N_{макс} = N_{кр}$  (рис. 2 б, справа). Очевидно, что в случае, когда распределение плотности достаточно равномерно, величины  $N_{cp}$  и  $N_{макс}$  должны быть близки. В наших экспериментах при различных напряжениях на коническом источнике величина  $N_{cp}/N_{макс}$  существенно отличалась от единицы (~0,1). Это означает, что распределение плотности по сечению струи имеет резко выраженный неоднородный характер. Проведенные оценки [5] указывают на наличие в плазменной струе слоя с толщиной порядка диаметра трубы, плотность которого на порядок превосходит плотность остальной части. Зондирование границ плазмоида показало, что этот слой представляет собой подобие цилиндрической оболочки, располагающейся вблизи стенок трубы. В хвосте струи распределение плазмы и характер границ резко меняются в результате дробления и распада плазменных образований.

### Выводы

Достаточно длительная эксплуатация описанного скоростного интерферометра в рабочих условиях показала, что данный прибор полностью соответствует указанным выше параметрам. Это обеспечивает возможность регистрации процесса при минимальной длительности до 150—200 нсек (при 5—10 экспериментальных точках на весь процесс), скорости изменения концентрации заряженных частиц до  $10^{13}$  см<sup>-3</sup> мксек<sup>-1</sup>, минимальной концентрации  $5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup> (при эффективном диаметре плазмоида порядка 50 мм), скорости движения границ  $1,4 \cdot 10^6$  см·сек<sup>-1</sup>. Точность измерений не зависит от поглощения зондирующего сигнала (до 10—20 дБ) и внешних помех.

Система регистрации прибора может быть использована в различных диапазонах длин волн (с соответствующей высокочастотной схемой). Авторы благодарят Ю. М. Малявина за помощь в наладке аппаратуры при проведении экспериментов.

Институт ядерной физики  
Сибирского отделения Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
8 VI 1964

### ЛИТЕРАТУРА

- Ch. Wharton, D. Slager, Trans. IRE, 5-6, № 3, 20, 1959.  
А. А. Брандт, Р. Х. Куртмуллаев, Приборы и техника эксперимента, № 6, 94, 1958.  
Takeda Susumu, M. Roux, J. Phys. Soc. Japan, 16, № 7, 1395, 1961.  
F. J. Fitz Osborne, Canad. J. Phys., 40, № 11, 1620, 1962.  
Р. Х. Куртмуллаев, Ю. Е. Нестерихин, А. Г. Пономаренко, Теплофизика высоких температур, 2, № 5, 1964.  
В. Л. Гинзбург, Распространение электромагнитных волн в плазме, Физматгиз, 1960.