



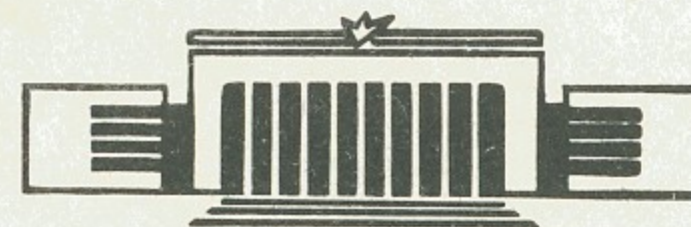
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

11

В.С. Бурмасов, С.Г. Воропаев, А.Л. Добривский,  
С.В. Лебедев, М.А. Щеглов

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ  
В ВАКУУМНОМ ДИОДЕ  
МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ  
МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

ПРЕПРИНТ 85-14



НОВОСИБИРСК

В.С.Бурмасов, С.Г.Воропаев, А.Л.Добривский<sup>\*)</sup>,  
С.В.Лебедев, М.А.Щеглов

**ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В ВАКУУМНОМ  
ДИОДЕ МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ  
МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

**А Н Н О Т А Ц И Я**

Экспериментально прослежена динамика заполнения плазмой мощного ( $\sim 10^{10}$  Вт) вакуумного микросекундного ( $\approx 5 \cdot 10^{-6}$  с) квазиплоского ( $\varnothing$  17 см) диода. Подробно описаны применяемая оптическая ( $\lambda = 3,39$  мкм) интерференционная методика измерения плотности плазмы и способ выделения сигнала на фоне помех, неизбежных при работе с таким диодом. Приводится график заполнения диода плазмой для трех сечений диодного промежутка: непосредственно у катода, в центре и прианодной области.

<sup>\*)</sup> Красноярский государственный университет.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В ускорителях, ориентированных на получение мощных релятивистских пучков (РЭП) микросекундной длительности, как правило, используются ненакаливаемые катоды. Применение таких катодов в ускорителях наносекундного диапазона ( $\sim 100$  нс) позволяет получать в ведущем магнитном поле достаточно однородные по сечению пучки с плотностью тока до  $10 \text{ кА/см}^2$  и выше. Длительность импульса тока в таких ускорителях определяется, в основном, генератором напряжения, а не работой вакуумного диода. В генераторах же микросекундного диапазона с плотностью тока  $j \sim 100 \text{ А/см}^2$  длительность РЭП определяется исключительно временем работы диода до замыкания.

Существующие в настоящее время представления о переключении диода основаны на заполнении диодного промежутка плазмой, возникающей в диоде при генерации пучка. Считается, что наиболее ответственной за такое переключение является плотная катодная плазма [1].

Исследования динамики переключения диода плазмой проводились, в основном, косвенными способами, без прямых измерений параметров плазмы (ссылки на подобные работы можно найти в [1]). Непосредственно плазменные измерения осуществлялись лишь в работах: [2], посвященной голографическому способу измерения плотности диодной плазмы; [3], в которой исследовалась динамика анодной плазмы магнитоизолированного диода наносекундной длительности, и в [4], где приводятся оценки плотности и скорости распространения плазмы в диоде микросекундной длительности с  $j \sim 10 \text{ А/см}^2$  по результатам СВЧ-измерений. Сюда следует также отнести работы [5, 6] по измерению параметров плазмы в модельных экспериментах.

В связи с этим представляется необходимым проведение непосредственных измерений плотности плазмы в квазиплоском диоде микросекундной длительности со средней плотностью тока  $j \sim 100 \text{ А/см}^2$ . Необходимо отметить, что проведение таких измерений в диодах мощных ускорителей сопряжено с определенными трудностями. Так, например, применение бесконтактных оптических методов затруднено из-за высокого уровня электромагнитных помех и значительного излучения из диода в широком спектральном диапазоне, включая рентгеновский.

В данной работе приведено подробное описание интерференционной методики, разработанной с учетом помех, возникающих при ра-

боте диода, а также представлены результаты измерения плотности плазмы в диодном промежутке ускорителя РЭП микросекундной длительности.

## II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Измерения проводились на установке У-1 [7], предназначенной для исследования параметров РЭП с целью их оптимизации для экспериментов по нагреву плотной плазмы.

Схема интерференционных измерений на установке представлена на рис. 1. Напряжение от генератора импульсного напряжения (на схеме не показан) через вакуумный ввод 10 подавалось на графитовый катод 9 вакуумного диода.

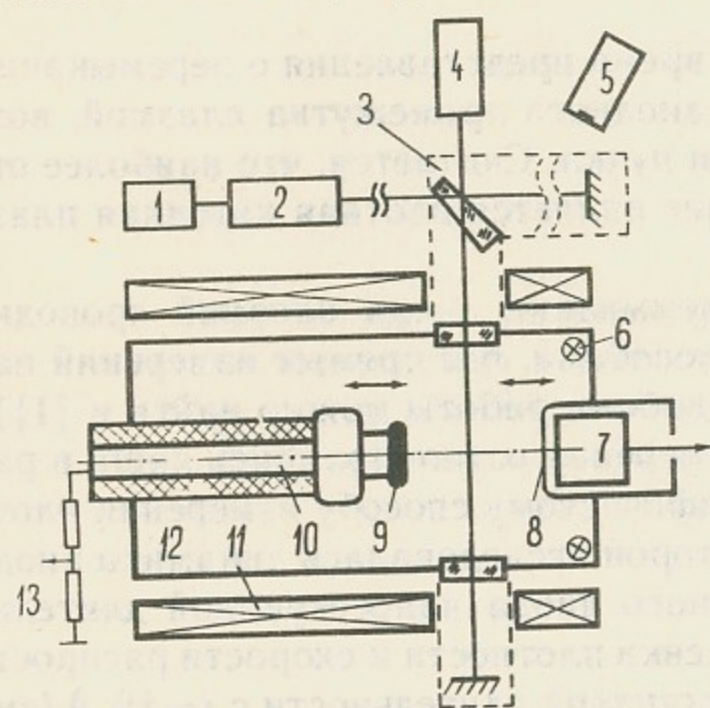


Рис. 1. Схема эксперимента.

Величина напряжения на диоде в этих экспериментах составляла 600 кВ, а длительность импульса  $\approx 5$  мкс. Камера вакуумного диода 12 служит каркасом для соленоида 11, предназначенного для создания импульсного магнитного поля с напряженностью у катода 3—7 кЭ при длительности  $\approx 20$  мс. В качестве анода использовалась алюминиевая фольга 8 толщиной 30 мкм. За фольгой располагался графитовый коллектор-калориметр 7. Диаметр электронного пучка определялся диаметром катода и был равен 17 см.

Катодный и анодный узлы конструктивно выполнены таким образом, что имелась возможность перемещения катода и анода вдоль оси диода (см. стрелки на рис. 1). Это позволяло проводить измерения на различных расстояниях от катода при постоянном диодном промежутке, равном 7, 8 см без переюстировки оптической системы, которая включает в себя интерферометр 3, лазер 4, оптический усилитель 2 и детектор 1. Регистрация рентгеновского излучения, тока в диоде и напряжения осуществлялась соответственно сцинтилляционным детектором 5, поясом Роговского 6 и делителем напряжения 13. Энергия пучка измерялась коллектор-калориметром 7.

Остаточное давление в диодной камере поддерживалось на уровне, не превышающем  $5 \cdot 10^{-5}$  торр с помощью безмасляной откачки.

## III. ОПИСАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ МЕТОДИКИ

При конструировании и монтаже интерферометра на установке особое внимание обращалось на снижение вибропомех, которые могут быть существенными при интерферометрии на длине волны  $\lambda = 3,39$  мкм, и на помехозащищенность от электромагнитных наводок. В частности, для того, чтобы обеспечить виброустойчивость интерферометра от воздействия импульсного магнитного поля, все детали интерферометра были изготовлены из диэлектрических материалов: станина (поз. 1 на рис. 2) — из текстолита, зеркала — из стеклянных подложек, напыленных алюминием. Для защиты детектора от электромагнитного излучения приемник, эммитерный повторитель и источник питания помещались в медный кожух. Передача сигнала от детектора к регистрирующей аппаратуре осуществлялась радиотехническим кабелем с дополнительным экраном.

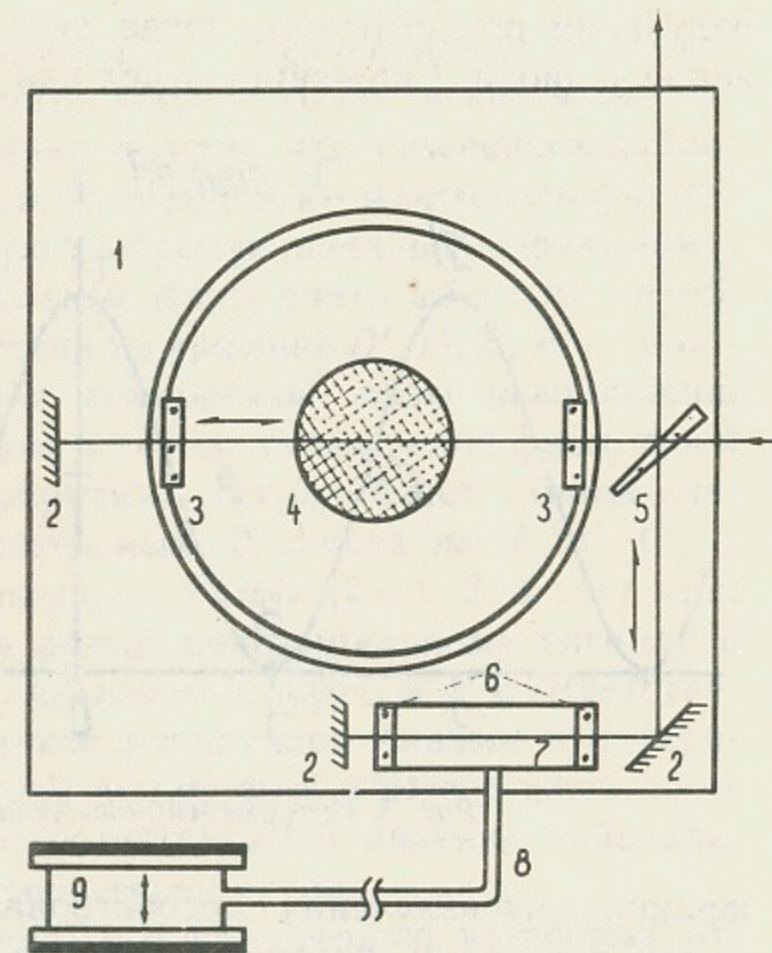


Рис. 2. Схема интерферометра.

Интерферометр собран по двухпроходной схеме Майкельсона с длинами плеч, равными  $\approx 1$  м. Светоделительная пластина 5, окна диодной камеры 3 и окна калибровочной камеры 7 изготовлены из плавящего кварца.

В качестве источника излучения использовался трехволновый (0,63; 1,15; 3,39 мкм) гелий-неоновый лазер ЛГ-126. Для выделения одной поперечной моды с целью увеличения контрастности интерференционной картины внутрь резонатора, со стороны выходного зеркала, была вставлена диафрагма диаметром 2 мм.

Детектирование инфракрасного излучения ( $\lambda = 3,39$  мкм) осу-

ществлялось с помощью фотосопротивления ФСГ-22-3А, вольт-ваттная чувствительность которого на указанной длине волны излучения составляет примерно 1000 В/Вт. Темновое сопротивление детектора  $\sim 100$  кОм. С целью улучшения временного разрешения детектора до  $\tau \approx 0,5$  мкс, в качестве нагрузки использовалось сопротивление  $\approx 10$  кОм, в результате чего чувствительность фотосопротивления снизилась до 100 В/Вт. Величина сигнала, снимаемого с детектора, составляла  $\approx 1$  В при мощности излучения  $\approx 10$  мВт.

В ходе предварительных экспериментов было установлено, что помехозащищенность детектора от рентгеновского и инфракрасного излучений недостаточна, когда детектор располагался непосредственно у диода. Снижению помех как от рентгеновского, так и от ин-

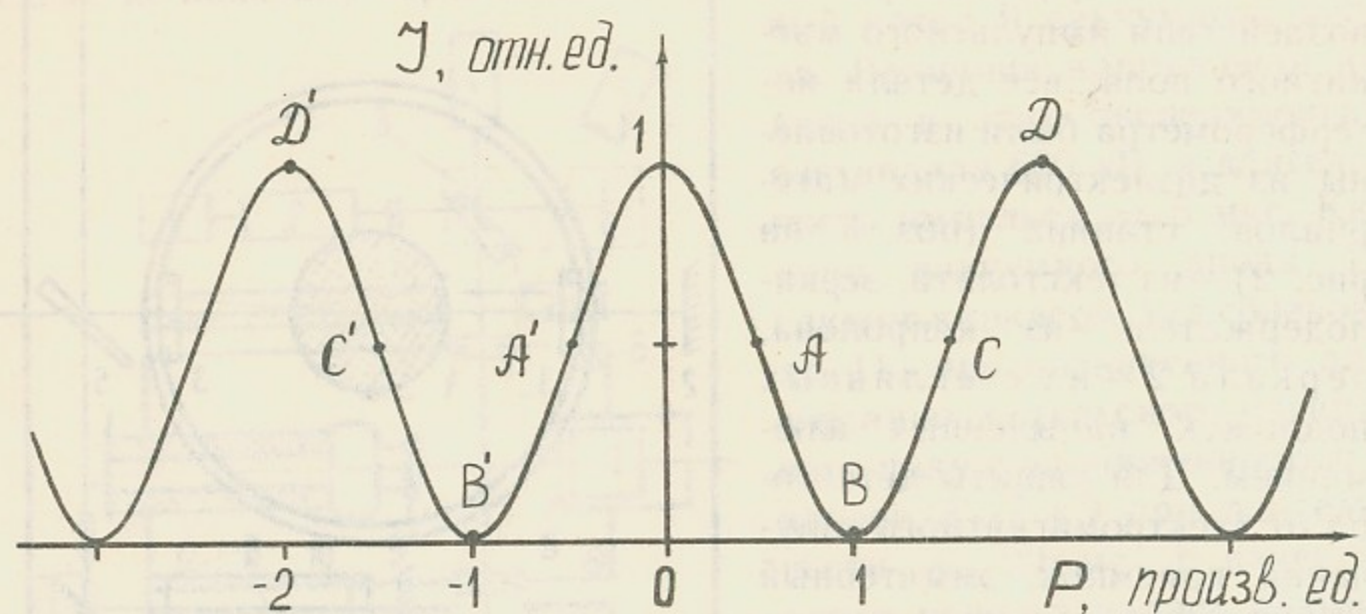


Рис. 3. Интерференционная калибровочная кривая.

фракрасного излучения способствовало удалению детектора на 5 м от диода в сторону, противоположную направлению распространения РЭПа. При этом интерференционный сигнал уменьшился до уровня шумов детектора  $\approx 10$  мВ. Для увеличения отношения сигнал-шум использовались два оптических селективных усилителя, представляющих собой газоразрядные трубки длиной  $\approx 1$  м каждая, используемые в качестве активных элементов в гелий-неоновых лазерах. Особое внимание при этом уделялось линейности усиления. Применение усилителей позволило повысить отношение сигнал-шум более чем на два порядка.

Калибровка интерферометра, обязательная при измерениях интерференционных сигналов, составляющих долю полосы, производилась дистанционно с помощью системы калибровки, состоящей из калибровочной камеры 7 (см. рис. 2) с окнами 6, воздухопровода 8,

соединенного с сильфоном, который используется в качестве компрессора 9.

На рис. 3 приведен график процесса калибровки интерференционного сигнала. Поскольку изменение давления  $P$  в калибровочной камере, расположенной в опорном плече интерферометра, вызывает пропорциональное изменение разности фаз между опорным и измерительным лучом  $\varphi$ , то и сигнал с детектора в зависимости от давления будет определяться законом для интерферирующих лучей равной интенсивности ( $I_1 = I_2 = I_{1,2}$ )

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \alpha P$$

где  $I_0 = 4I_{1,2}$ , а  $\alpha$  — константа равная  $\varphi/2P$ . Выравнивание интенсивностей  $I_1, I_2$  опорного и предметного лучей легко достигается при юстировке интерферометра. Из рисунка 3 видно, что изменением давления в калибровочной камере можно определить максимальную интенсивность  $I_0$  и установить любую требуемую начальную фазу измерения  $\varphi_0$ . Если в качестве начальной фазы взять  $\varphi_0 = \pm k\pi$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ) (см. соответствующие точки на графике  $D', D, B, B'$ ), то определить направление изменения измеряемой фазы невозможно. Действительно, в точках  $D$  и  $D'$  как в случае уменьшения фазы, так и в случае ее увеличения регистрируемый сигнал будет отрицательным, а в точках  $B$  и  $B'$  — положительным. В точках же  $A, A', C, C'$  (соответствующие начальные фазы  $\varphi_0 = \pm k\pi/2$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ )) знак приращения фазы определяется легко: положительному сигналу в точках  $A$  и  $C'$  и отрицательному сигналу в точках  $C$  и  $A'$  соответствует уменьшение фазы, обусловленное появлением плазмы в измерительном плече. Сигналам обратной полярности в этих точках соответствует приращение фазы, что соответствует появлению нейтрального газа в измерительном плече интерферометра.

Таким образом, варьируя начальную фазу, можно, во-первых, отличить сигнал помехи от интерференционного сигнала и, во-вторых, отождествить последний с появлением нейтрального газа или плазмы, т.к. показатель преломления нейтрального газа больше единицы, а показатель преломления плазмы меньше единицы. Следовательно, положительному сигналу в точках  $A'$  и  $C$  и отрицательному сигналу в точках  $A$  и  $C'$  соответствует появление плазмы в измерительном плече интерферометра.

Легко показать (см., например, [8] с. 14), что при частичной ионизации газа (например, воздуха) вклад нейтральной компоненты в фазовый сдвиг (при  $\lambda = 3,39$  мкм) станет сравнимым только при степени ионизации  $\sim 0,1\%$ .

Заметим, что в точках  $A, A'$  и  $C, C'$  реализуется максимальная

чувствительность интерферометрических измерений плотности плазмы [9].

Измерения проводились на трех различных расстояниях от катода: 0,2; 4; 6,5 см. В каждом таком положении проводилась серия выстрелов, измерения в которых осуществлялись с различными начальными фазами. После каждого выстрела окна вакуумной камеры и катода очищались от распыленного в диоде вещества.

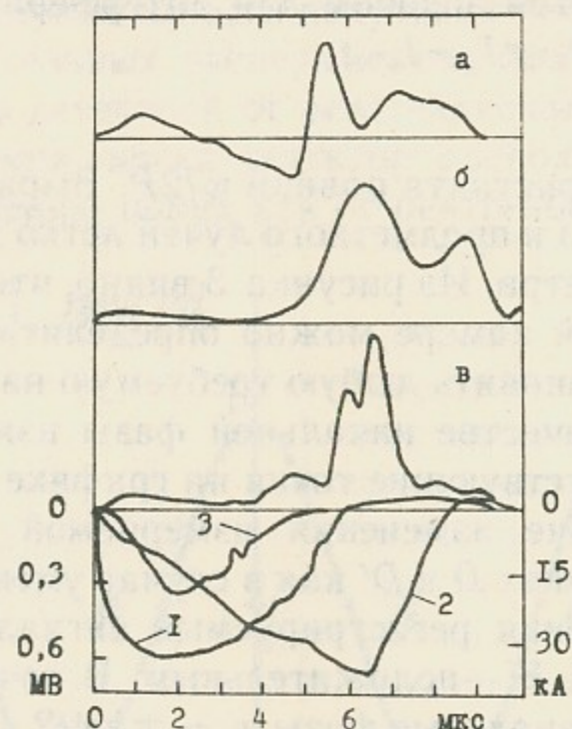


Рис. 4. Интерферограммы (а, б, в), синхронизованные с осциллограммами напряжения (1), тока (2) и рентгеновского излучения (3), полученные в трех различных сечениях диодного промежутка (а—0,2; б—4; в—6,5 см от катода.)

Кроме основного осциллографирования интерференционного сигнала с разверткой 1 или 2 мкс/дел во время генерации РЭП проводились также два других более медленных осциллографирования с развертками 50 мкс/дел и 2 мс/дел. Последняя развертка позволяла контролировать изменение начальной фазы интерферометра до и после импульса магнитного поля.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 приведены интерферограммы, полученные в серии выстрелов для каждого из сечений измерения. Здесь же приведены типичные для этих измерений осциллограммы напряжения 1, тока 2, и рентгеновского излучения 3. Заметим, что основное внимание в эк-

сперименте уделялось измерениям в прикатодной области, где ожидалось появление плазмы с концентрацией, превышающей более чем на порядок чувствительность применяемой интерференционной методики ( $\bar{n}_e \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ).

Выделение полезного сигнала, обусловленного плотностью плазмы, осуществлялось путем сравнения интерферограмм, полученных при измерениях с начальными фазами, отличающимися на  $180^\circ$ , как

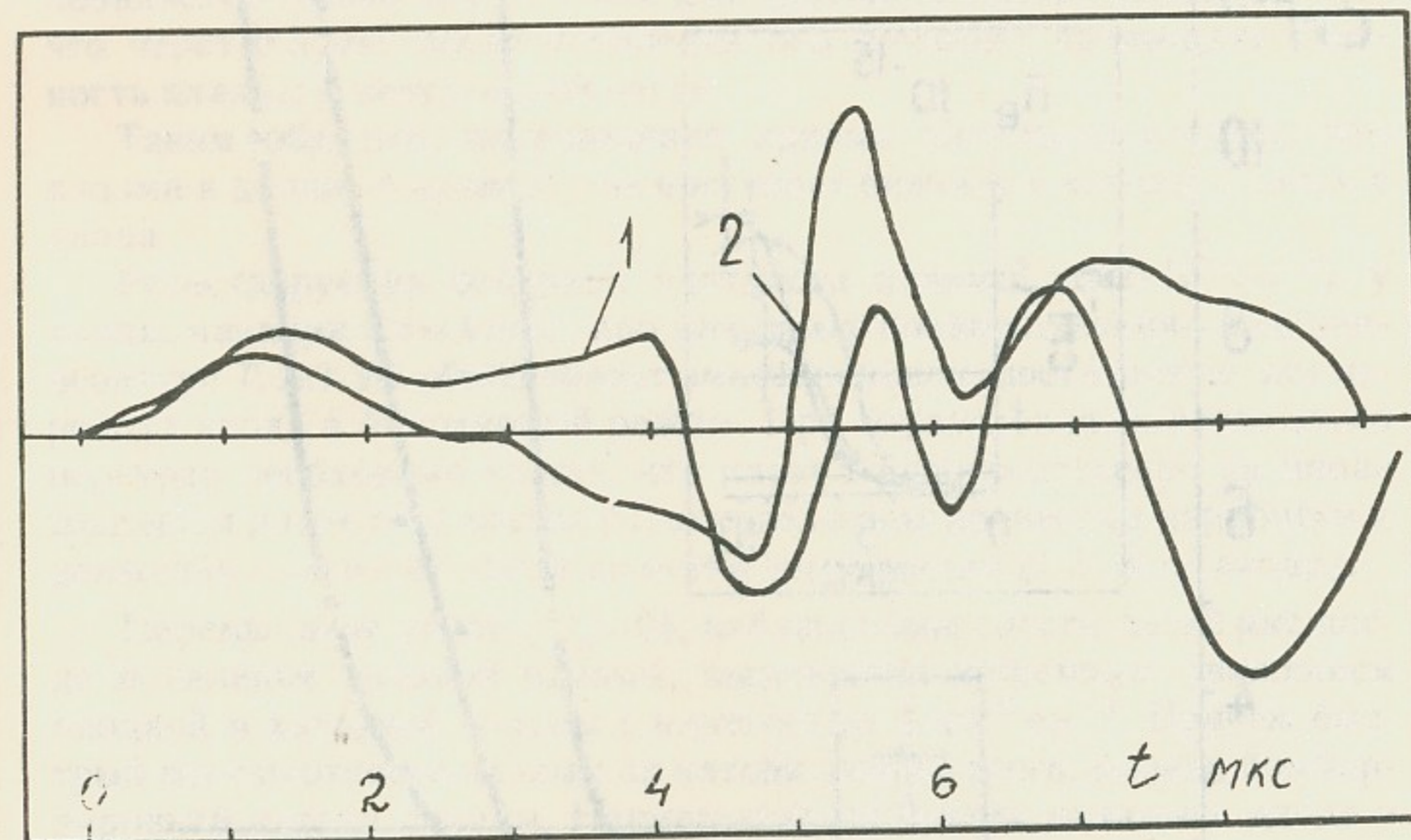


Рис. 5. Способ выделения интерференционного сигнала на фоне наводки. Начальные фазы интерферограмм: (1)— $270^\circ$ ; (2)— $90^\circ$ .

это показано на рис. 5. Здесь сравниваются катодные интерферограммы, одна из которых приведена на рис. 4а. Величина интерференционного сигнала определялась половиной разности амплитуд интерферограмм в одни и те же моменты времени.

Результаты обработанных подобным образом интерферограмм представлены в виде графиков на рис. 6. При обработке предполагалось, что плазма распределена равномерно по радиусу диода и ее поперечный размер равен диаметру электронного пучка. Значение плотности в каждой точке графика вычислялось по нескольким (не менее трех) интерферограммам. Весь график условно разбит на три зоны, для каждой из которых указана статистическая ошибка измерения.

Из рис. 6 видно, что плазма у катода регистрируется спустя

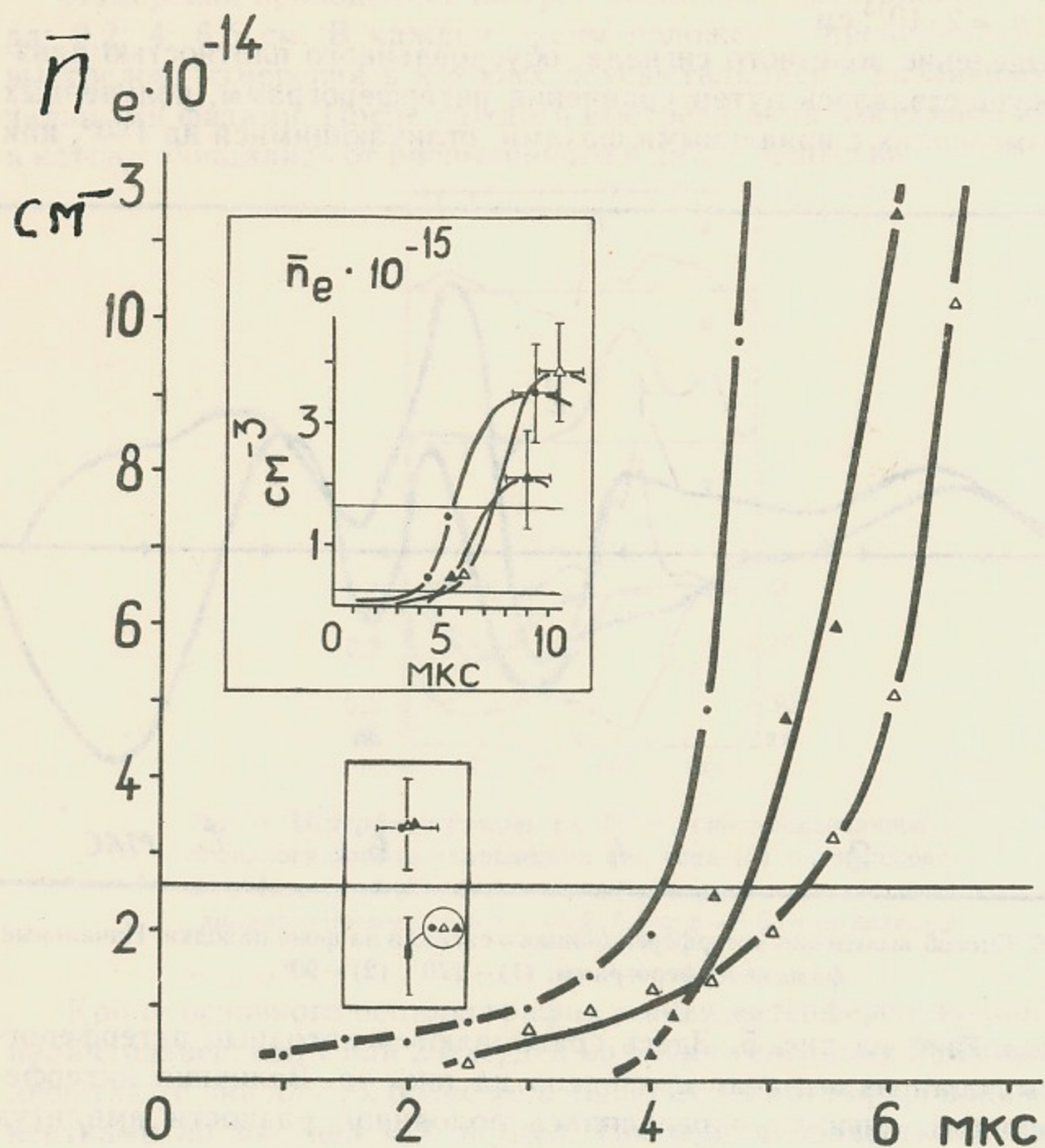


Рис. 6. Временная зависимость плотности плазмы для трех различных сечений диодного промежутка (○—0,2 см от катода, △—4 см, ▲—6,5 см).

1 мкс после начала импульса, когда ее плотность начинает превышать порог регистрации. Далее, с течением времени плотность плазмы медленно возрастает, коррелируя с плотностью тока в диоде. Плазма в центральной части диодного промежутка (4 см от катода) регистрируется начиная с  $t=2,5$  мкс, причем ее плотность меньше плотности плазмы у катода в течение всего импульса. На расстоянии 6,5 см от катода (1,3 см от анода) плазма с плотностью  $2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> появляется только при  $t=4$  мкс и ее плотность быстро нарастает так, что через 0,5 мкс после появления она начинает превышать плотность плазмы в центральной части.

Таким образом, из поведения кривых плотности следует, что плазма в диодный промежуток поступает вначале с катода, а затем с анода.

Регистрируемая величина плотности плазмы ( $\approx 2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>) у анода, начиная с  $t=4$  мкс, при разумных предположениях о ее температуре  $T_e \approx 1$  эВ обеспечивает эмиссию ионов, достаточную для перехода диода в биполярный режим. При определении момента этого перехода необходимо учесть, что плазма непосредственно на аноде создается ранее  $t=4$  мкс на  $\Delta t$ , определяемое процессом наработки и движения плазмы от анода до места регистрации (1,3 см от анода).

Перекрытие диода ( $U_d=0$ ), наблюдаемое спустя  $\Delta t \approx 2$  мкс после появления анодной плазмы, вызывается встречным движением анодной и катодной плазмы с плотностью  $\sim 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Причем быстрый рост плотности плазмы на катоде, скорее всего, вызван бомбардировкой катода ионами. Наименьшая плотность плазмы в диоде в момент замыкания ( $t=6$  мкс), измеренная в центральной части, не превышает  $5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>.

В заключение отметим следующие основные результаты работы.

1. Проведены непосредственные измерения заполнения плазмой мощного релятивистского диода микросекундной длительности с порогом регистрации  $n_e \approx 2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>.
2. Плазма в диодный промежуток поступает с электродов диода—вначале с катода, а затем с анода.
3. В течение импульса генерации РЭП зарегистрирована анодная плазма с плотностью, достаточной для перехода диода в биполярный режим.

Можно надеяться, что применение описанной здесь интерференционной методики измерения окажется существенным в дальнейшем, более детальном, изучении динамики диодной плазмы с целью исследования механизма переключения мощных релятивистских диодов микросекундной длительности.

Пользуясь предоставившейся возможностью, выражаем признательность Э.П. Круглякову за постоянное внимание к работе. Благодарим коллектив лаборантов на установке У-1 за помощь в проведении экспериментов; В.Г. Козлова за монтаж диагностической аппаратуры; конструктора В.К. Шарапова за удачно сконструированный интерферометр; В.В. Конюхова и К.К. Меклера за созданную ими систему масштабирования с помощью ЭВМ, оказавшуюся полезной при оформлении настоящей работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Литвинов Е.А., Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Автоэмиссионные и взрывоэмиссионные процессы при вакуумных разрядах. — УНФ, 1983, т.139, вып.2, с.265—302.
2. Kelly L.P., Mix J.G. Measurements of high-current relativistic electron diode plasma properties with holographic interferometry. — J. Appl. Phys., 1975, v.46, N 3, p.1084—1090.
3. Pal R., Hammer D. Anode plasma density measurements in a magnetically insulated diode. — Phys. Rev. Lett., 1983, v.50, N 10, p.732—735.
4. Никонов А.Г., Ройфе И.М., Савельев Ю.М., Энгелько В.И. О работе диода с магнитной изоляцией при большой длительности импульса. — ЖТФ, 1983, т.53, вып.4, с.683—690.
5. Бакирт Р.Б., Бугаев С.П., Литвинов Е.А., Стасьев В.Г. Исследование формирования сильноточной вакуумной искры методом скоростной интерферометрии. — ТВТ, 1976, т.14, вып.6, с.1145—1150.
6. Бакирт Р.Б., Кабламбаев Б.А., Раздобарин Г.Т., Ратахин Н.А. Измерение параметров плазмы в диоде с взрывной эмиссией электронов методом томсоновского рассеяния. — ЖТФ, 1979, т.49, вып.6, с.1245—1247.
7. Лебедев С.В., Чикунев В.В., Щеглов М.А. Генерация РЭП микросекундной длительности в плоском диоде. — Письма в ЖТФ, 1982, т.8, вып.11, с.693—696.
8. Бурмасов В.С., Кругляков Э.П., Подыминогин А.А. Интерферометр Майкельсона с CO<sub>2</sub>-лазером для измерения плотности плазмы. — Физика плазмы, 1978, т.4, вып.1, с.140—143.
9. Душин Л.А., Павличенко О.С. Исследование плазмы с помощью лазеров. — М.: Атомиздат, 1968. — 144 с.

В.С. Бурмасов, С.Г. Воропаев, А.Л. Добривский,  
С.В. Лебедев, М.А. Щеглов

#### ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В ВАКУУМНОМ ДИОДЕ МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Подписано в печать 31 января 1985 г. МН 06510  
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,5 печ.л., 1,2 уч.-изд.л.  
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 14

Набрано в автоматизированной системе на базе фотонаборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и отпечатано на ротапинтере Института ядерной физики СО-АН СССР,  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.