

51

56

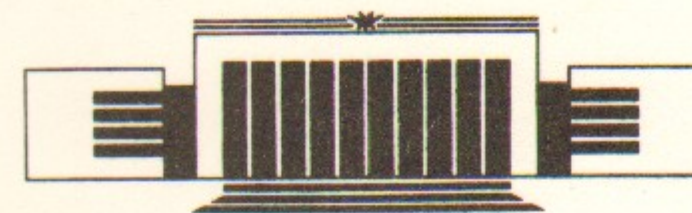


Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера

В.И. Давыденко, А.А. Крейтер

ПОЛУЧЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО
СУБМИКРОСЕКУНДНОГО ПУЧКА
БЫСТРЫХ АТОМОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СЕТОЧНОГО МОДУЛЯТОРА

ИЯФ 95-89



НОВОСИБИРСК

Получение диагностического субмикросекундного пучка быстрых атомов с использованием сеточного модулятора

В.И. Давыденко, А.А. Крейтер

Государственный научный центр РФ
Институт ядерной физики им Г.И. Будкера
СО РАН Новосибирск, Россия

Для реализации ряда новых предложений по диагностике параметров плазмы в магнитных ловушках требуются диагностические пучки быстрых атомов с длительностью порядка микросекунды. В работе изучалась модуляция плазменного эмиттера ионного источника диагностического инжектора сеточным электродом, расположенным перед плазменным электродом ионно-оптической системы. Проведенные эксперименты показали, что достаточные параметры модуляции плазменного эмиттера обеспечиваются при подаче на сетку импульса напряжения с амплитудой 50–100 В. При испытаниях ионного источника с сеточным модулятором получен протонный пучок с длительностью фронта 400 нс.

© Государственный научный центр РФ
Институт ядерной физики им Г.И. Будкера

1 Введение

В настоящее время появилось несколько предложений по использованию инъекции атомарных пучков субмикросекундной длительности для диагностики плазмы в системах с магнитным удержанием. При этом в плазме создается пространственно локализованный сгусток пробных ионов, изучение движения которого позволяет определить структуру магнитного поля (в частности, фиксировать рациональные магнитные поверхности в токамаках), измерить величины электрического и магнитного полей, электронную температуру и другие важные характеристики. Хотя конкретные диагностические схемы рассматривались, в основном, применительно к токамакам [1], субмикросекундные атомарные пучки могут дать уникальные возможности для диагностики и в других типах магнитных ловушек (в частности, в открытых ловушках).

Предварительные оценки показывают, что для реализации этих методов требуется длительность пучка менее или порядка микросекунды. В настоящее время способы получения атомарных пучков с малым угловым и энергетическим разбросом и нужной длительностью разработаны недостаточно. Некоторые предложения по созданию таких пучков приведены в [2]. Нами изучался один из предложенных способов получения субмикросекундных пучков с использованием модуляции плазменного эмиттера дополнительным сеточным электродом. Модуляция осуществляется следующим образом: в ионно-оптической системе инжектора непосредственно перед плазменным электродом устанавливается дополнительный

электрод (модулятор), поглощающий ионы пучка. Подавая напряжение на модулятор можно изменять плотность тока пучка сформированного ионно-оптической системой.

2 Изучение процесса поглощения ионов модулятором

2.1 Схема эксперимента

Эксперименты проводились с использованием ионного источника диагностического инжектора [3]. Схема эксперимента приведена на рис.1. Водородная плазма из анодного отверстия генератора расширялась в экспандерное пространство, где находились два ленгмюровских зонда, изготовленных из молибденовой проволоочки диаметром 0.2 мм, и проходила модулятор, ограниченный диафрагмой. За модулятором были установлены два плоских зонда, первый на расстоянии 0.5 см, второй был удален на расстояние 80 см. Зондовые измерения проводились в режиме ионного тока насыщения.

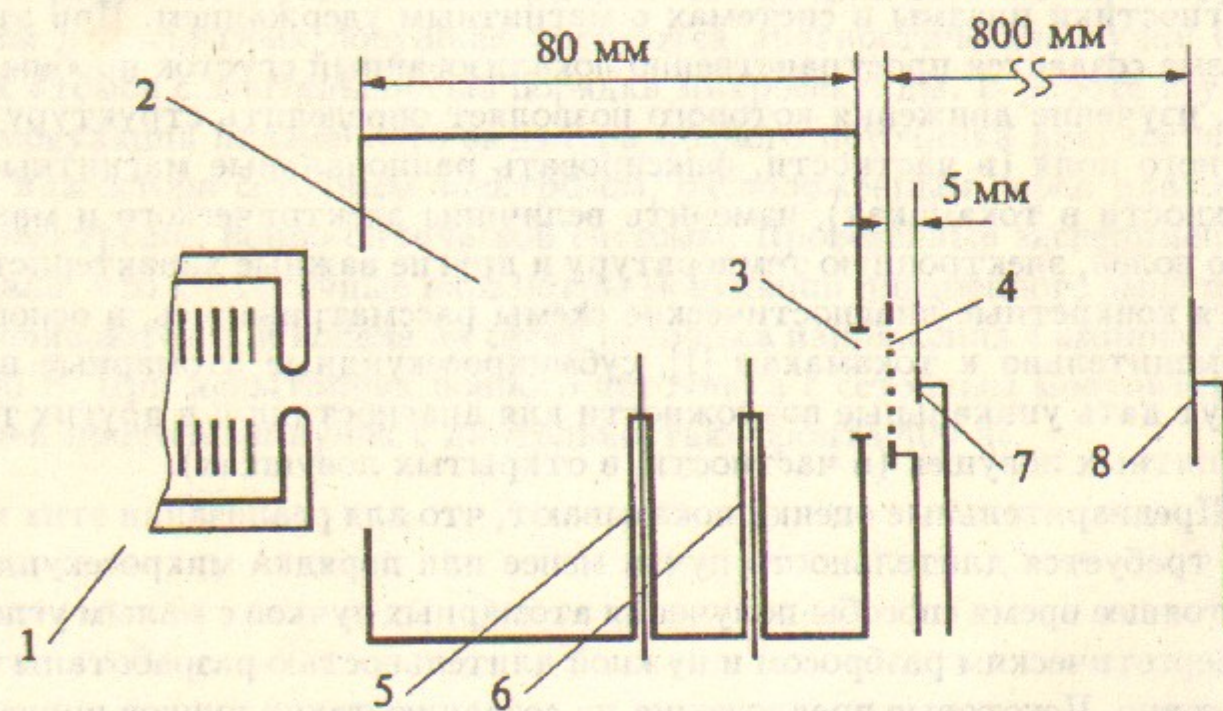


Рис. 1. Схема эксперимента по модуляции плазменного эмиттера: 1 - генератор плазмы, 2 - экспандерное пространство, 3 - диафрагма, 4 - сеточный электрод, 5 - 8 - зонды.

Модулятор представлял собой сетку из молибденовой проволоочки диаметром 0,05 мм с внутренним размером ячейки 0,28×0,28 мм. Геометрическая прозрачность модулирующей сетки составляла примерно 70%. Подача напряжения на модулятор осуществлялась от тиристорного генератора, обеспечивающего длительность переключения 200 нс.

2.2 Эксперименты в статическом режиме

Вначале были проведены эксперименты в статическом режиме при подаче на модулирующую сетку постоянного напряжения. На рис.2 приведены зависимости тока на третий зонд, расположенный непосредственно за сеткой, от напряжения на ней при различных плотностях тока пучков. Из представленных на рисунке зависимостей видно, что при подаче на сетку отрицательного напряжения ток на зонд снижается вследствие поглощения ионов сеткой. Подача положительного напряжения на сетку при невысокой плотности тока приводит к уменьшению тока на зонд из-за отражения ионов сеткой.

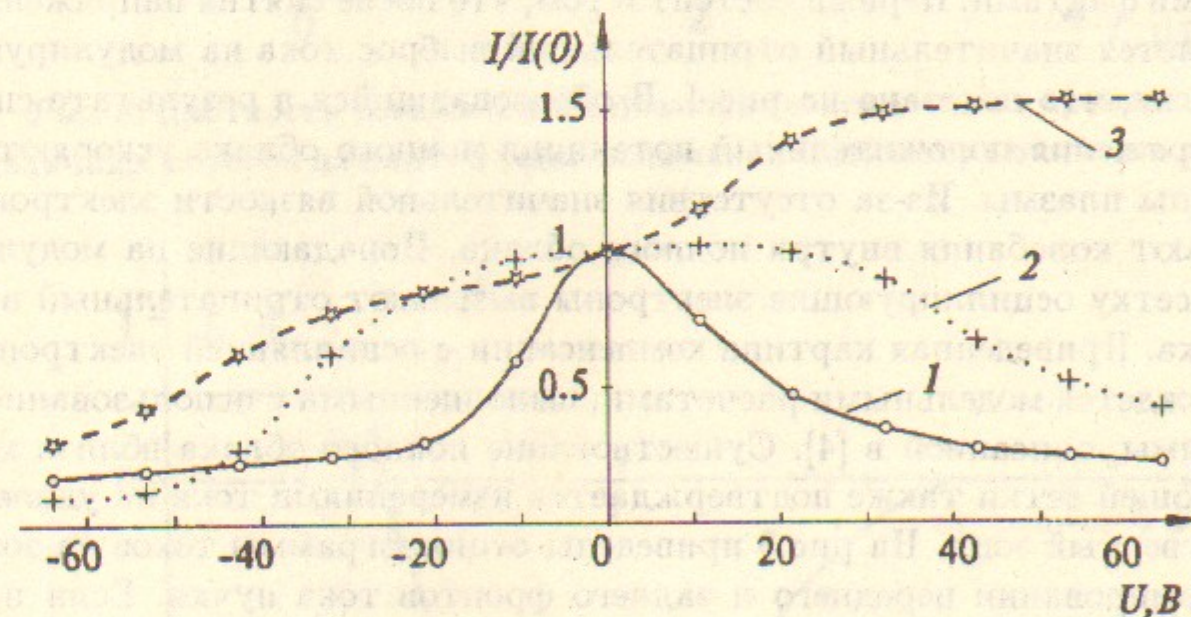


Рис. 2. Ток на близкий зонд в зависимости от напряжения на модулирующей сетке при различных плотностях ионного тока. Зависимость 1 получена при плотности тока 2.4 мА/см², зависимость 2 при 20 мА/см² и зависимость 3 при 90 мА/см².

При большой плотности тока ионов обнаруживается интересный эффект: с увеличением положительного напряжения на сетке ток на зонд не падает, а наоборот возрастает. По-видимому, это связано с перестройкой разряда вследствие появления дополнительного анода. Кроме того при

отрицательном потенциале сетки наблюдались высокочастотные колебания тока на зонд. Вследствие этих причин для осуществления импульсной модуляции использовалась подача отрицательного напряжения на сетку.

2.3 Импульсный режим модуляции

Для получения переднего фронта вначале на сетку подается отрицательное напряжение а затем в заданный момент времени напряжение с сетки снимается. На рис. 3 приведены осциллограммы тока на третий зонд для двух плотностей ионного потока. При малой плотности потока длительность переключения составляет 400 нс. При повышенной плотности потока длительность возрастает до 800 нс и кроме того через 1.2 мкс после снятия напряжения происходит импульсное снижение плотности потока. Обнаруженный переходный процесс по-видимому связан со сбросом облака ионов, находящихся в ленгмюровском слое возле модулирующей сетки. Существование облака подтверждается двумя экспериментальными фактами. Первый состоит в том, что после снятия напряжения наблюдается значительный отрицательный выброс тока на модулирующую сетку, что показано на рис.4. В образовавшийся в результате снятия напряжения положительный потенциал ионного облака ускоряются электроны плазмы. Из-за отсутствия значительной вязкости электроны совершают колебания внутри ионного облака. Попадающие на модулирующую сетку осциллирующие электроны вызывают отрицательный выброс тока. Приведенная картина компенсации с осцилляцией электронов подтверждается модельными расчетами, выполненными с использованием программы, описанной в [4]. Существование ионного облака вблизи модулирующей сетки также подтверждается измерениями тока на удаленный четвертый зонд. На рис.5 приведены осциллограммы токов на зонд при формировании переднего и заднего фронтов тока пучка. Если при формировании заднего фронта вследствие высокой монохроматичности ионов плазменного потока возникает резкий спад потока, отстоящий от момента подачи отрицательного напряжения на модулятор на 25 мкс, что соответствует энергии протонов 5 эВ, то при снятии отрицательного напряжения с модулятора подъем тока на зонд начинается через 17 мкс и фронт тока является размытым. Это обусловлено сбросом ионов с более высокими скоростями из ионного облака. Инжекция ионов из облака в экспандерное пространство приводит к импульсному возрастанию тока на первый и второй зонды с некоторыми колебаниями, что иллюстрируется

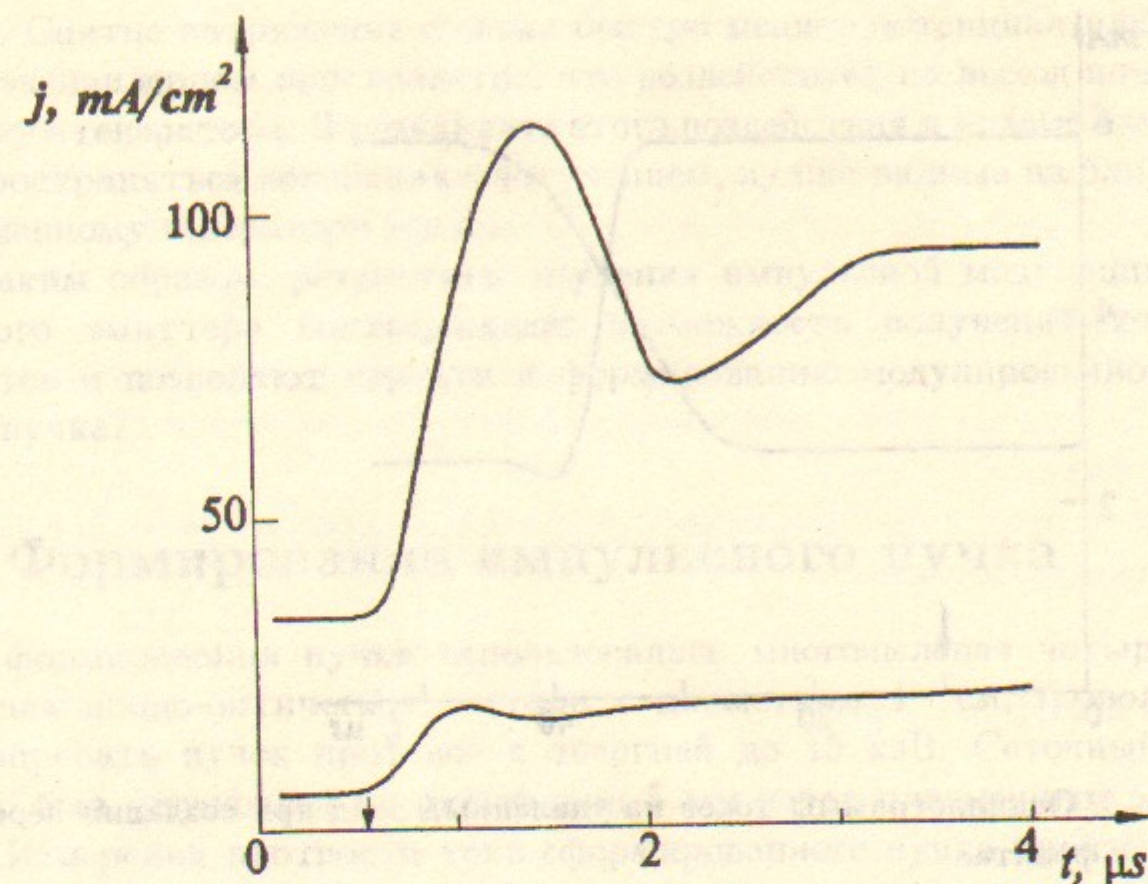


Рис. 3. Плотность тока на ближний зонд в зависимости от времени для двух различных потоков плазмы. Начало включения модулятора отмечено стрелкой.

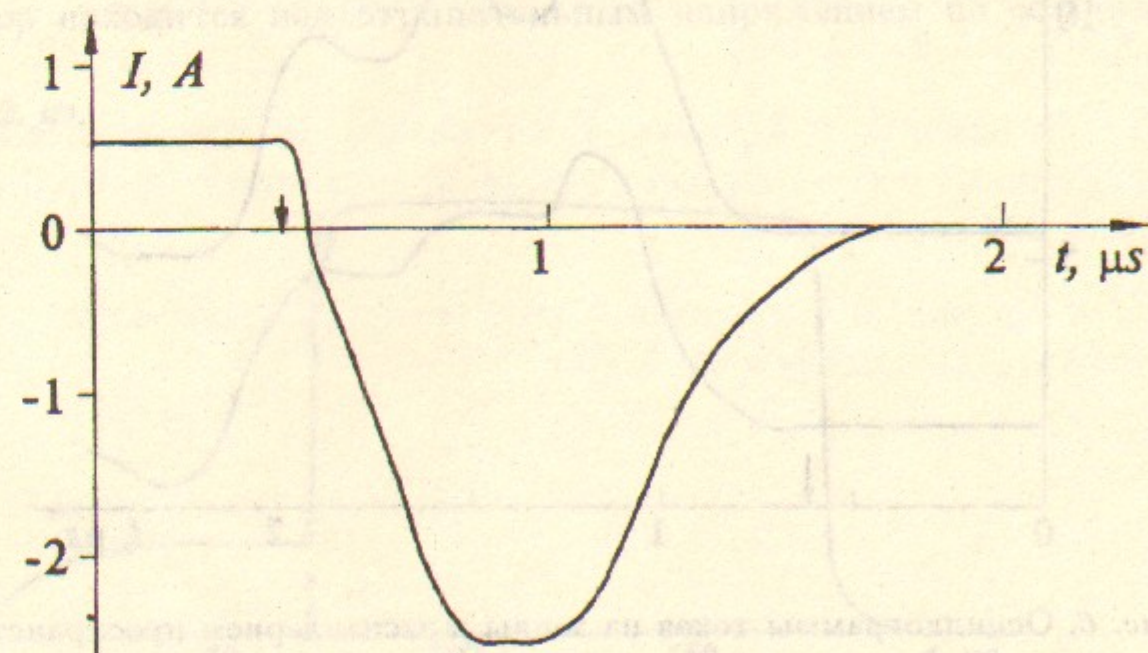


Рис. 4. Осциллограмма тока на модулирующую сетку при создании переднего фронта.

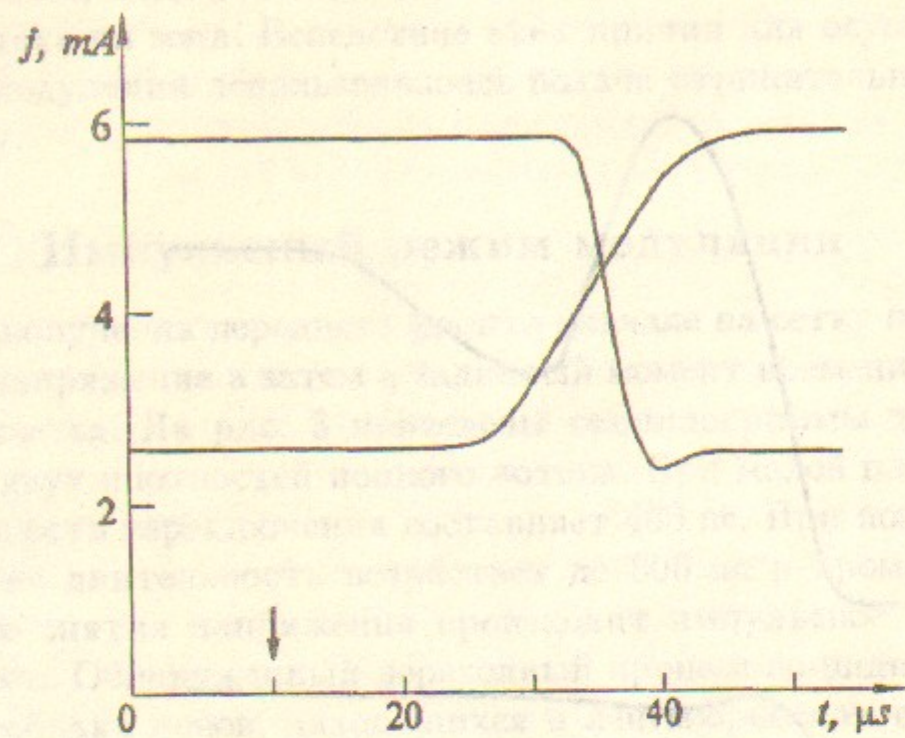


Рис. 5. Осциллограммы токов на удаленный зонд при создании переднего и заднего фронта.

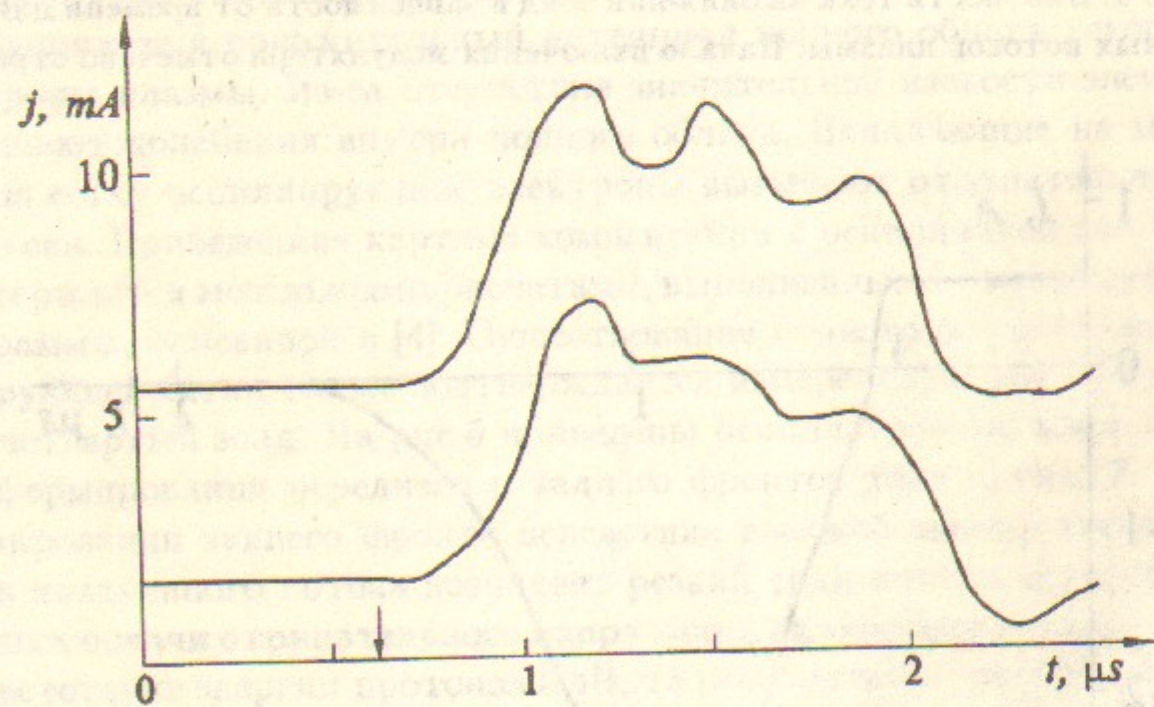


Рис. 6. Осциллограммы токов на зонды в экспандерном пространстве при создании переднего фронта. Верхняя осциллограмма соответствует ближнему к генератору плазмы зонду.

рис.6. Снятие напряжения с сетки быстро меняет потенциал плазмы во всем экспандерном пространстве, что воздействует на выход плазмы из дугового генератора. В результате этого воздействия в плазме начинают распространяться колебания с затуханием, лучше видные на ближнем к плазменному генератору зонде.

Таким образом, результаты изучения импульсной модуляции плазменного эмиттера подтверждают возможность получения коротких фронтов и позволяют перейти к формированию модулированного ионного пучка.

3 Формирование импульсного пучка

Для формирования пучка использовалась многоселевая четырехэлектродная ионно-оптическая система с диаметром 4 см, позволяющая формировать пучок протонов с энергией до 15 кэВ. Сеточный модулятор был установлен на расстоянии 5 мм перед плазменным электродом. Измерения плотности тока сформированного пучка производились вторично-эмиссионным детектором, расположенным на расстоянии 70 см от ионно-оптической системы.

Характерная осциллограмма с детектора при создании переднего фронта пучка приведена на рис.7. В начальный отрезок времени модулятор находится под отрицательным напряжением по отношению к

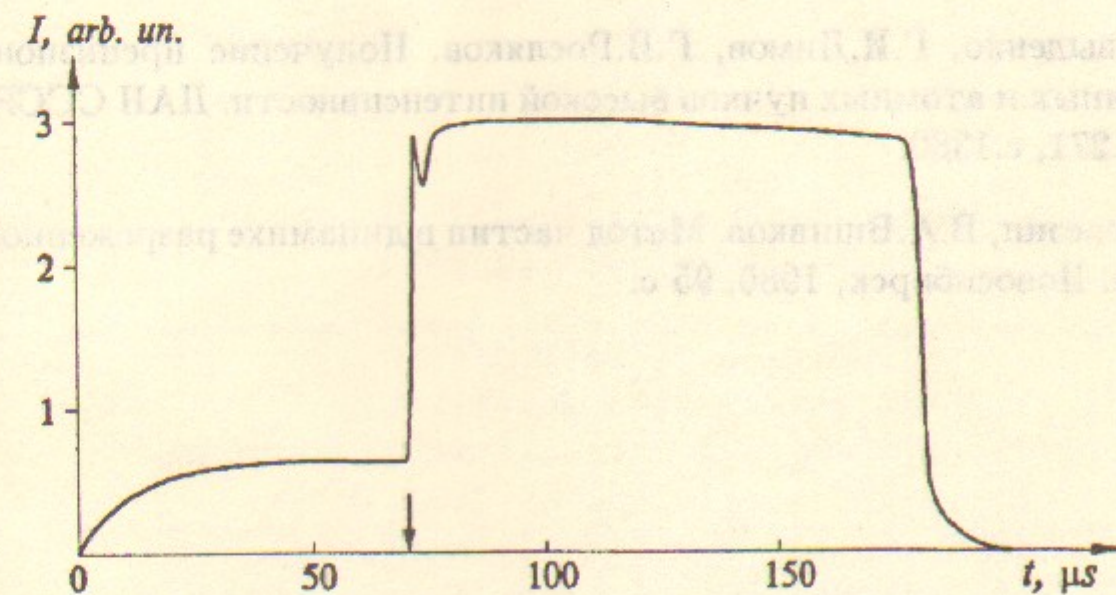


Рис. 7. Осциллограмма тока с детектора протонного пучка при создании переднего фронта.

плазменному электроду при этом формируется пучок с пониженным током. Затем напряжение с модулятора снимается и ток пучка возрастает. Отношение плотности тока пучка к плотности тока пьедестала для энергии протонов 5 кэВ, тока пучка 0.4 А и напряжения на модуляторе – 100 В составило 5 при длительности фронта 0.4 мкс. Для энергии протонов 9 кэВ и тока пучка 1 А отношение плотностей токов составило 3, а длительность фронта возросла до 1 мкс.

По-видимому, модуляцию пучка при высокой плотности тока можно улучшить за счет уменьшения ячейки сетки или установки второй модулирующей сетки.

Авторы выражают благодарность В.А.Новикову за помощь в проведении экспериментов.

4 Литература

1. V.I.Davydenko, A.A.Ivanov, A.N.Karpushov, R.Pozzoli, M.Rome, D.D.Ryutov. Radial electric field measurement in a tokamak by the injection of a pulsed neutral beam, Plasma Phys. Control. Fusion 36 (1994) 1805-1817.
2. V.I.Davydenko and A.A.Ivanov. Feasibility study for a novel pulsed neutral beam diagnostics for tokamaks. Препринт ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН N 93-10, 1993.
3. В.И.Давыденко, Г.И.Димов, Г.В.Росляков. Получение прецизионных ионных и атомных пучков высокой интенсивности. ДАН СССР, 1983, т.271, с.1380.
4. Ю.А.Березин, В.А.Вшивков. Метод частиц в динамике разреженной плазмы. Новосибирск, 1980, 95 с.