

7. Молоковский С. И., Сушков А. Д. Интенсивные электронные и ионные пучки.— Л.: Энергия, 1972.
8. Давыденко В. И., Димов Г. И., Росляков Г. В. Получение прецизионных ионов и атомных пучков высокой интенсивности.— Новосибирск, 1983.— (Препр./АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т ядер. физики; № 83—18).
9. Димов Г. И., Росляков Г. В. Развитие атомарных инжекторов для нагрева и диагностики плазмы в ИЯФ СО АН СССР // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядер. синтез.— 1984.— Вып. 3(16).
10. Габович М. Д. Физика и техника плазменных источников ионов.— М.: Атомиздат, 1972.
11. Димов Г. И., Кононенко Ю. Г., Савченко О. Я., Шамовский В. Г. Эксперименты по получению интенсивных пучков ионов водорода // ЖТФ.— 1968.— Т. 38.
12. Димов Г. И., Росляков Г. В. Импульсный перезарядный источник отрицательных ионов водорода // ПТЭ.— 1974.— № 1.
13. Тепляков В. А., Дербилов В. И. Изучение аксиально симметричного пучка ионов // ПТЭ.— 1969.— № 1.
14. А. с. 1494840 СССР. Импульсный линейный ускоритель протонов/В. Н. Гетманов, О. Я. Савченко // Открытия. Изобретения.— 1990.— № 21.
15. Гетманов В. Н., Савченко О. Я. Применение плазменного эмиттера, стабилизированного сеткой, в системе формирования высокоэнергетического пучка протонов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядер.-физ. исследования.— 1989.— Вып. 5/5.

г. Новосибирск

Поступила 21/IV 1987 г.,
в окончательном варианте — 4/VIII 1989 г.

УДК 621.384.6 : 537.534.7

В. И. Баткин, О. Я. Савченко

ВРЕМЯПРОЛЕТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Дуговой источник протонов [1—3], применяемый как узел системы диагностики плазмы [4] или как узел высоковольтных инжекторов прецизионных протонных пучков [5, 6], испытывает на себе влияние внешних магнитных полей. Кроме того, магнитное поле можно использовать для управления потоком плазмы [5, 7, 8]. В связи с этим в [8, 9] изучалось влияние продольного магнитного поля в диапазоне от 1 до 100 Гс на плазменную струю. В [8] установлено, что четырехкратное увеличение тока под действием магнитного поля 40 Гс связано в основном с фокусировкой плазменной струи, причем приведенные данные указывают на то, что фокусирующее воздействие локализовано в области на расстоянии 1 см от анода генератора плазмы. Обнаружено также, что фокусировка связана с наличием в струе электронного тока. В предлагаемой работе создавался импульсный электронный ток, длительность которого намного меньше времени пролета протонов области действия магнитного поля, что позволило времяпролетным методом определить особенности действия магнитного поля на разные участки струи.

На рис. 1 изображена установка, на которой проводились измерения. Дуговой генератор плазмы 1 выбрасывает плазменную струю на сеточный диод 8, 9, формирующий пучок протонов. Протонный ток в струе около 0,5 А, ток пучка 0,1 А. Магнитное поле, действующее на плазменную струю, создавалось установленным непосредственно на аноде соленоидом 2 сечением 10×4 мм² или соленоидом 4 диаметром 30 мм, расположенным на расстоянии 70 мм от сеточного электрода 8. На электродах 3, 5, 7 поддерживалось отрицательное напряжение —100 В относительно анода. При этом магнитное поле не фокусировало плазменную струю, так как электронные токи в плазменной

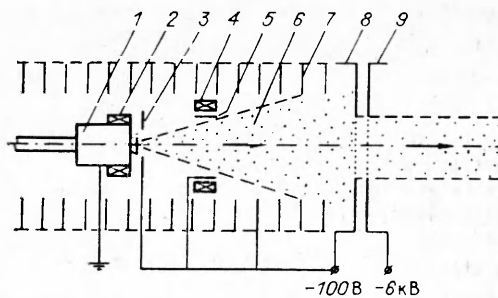
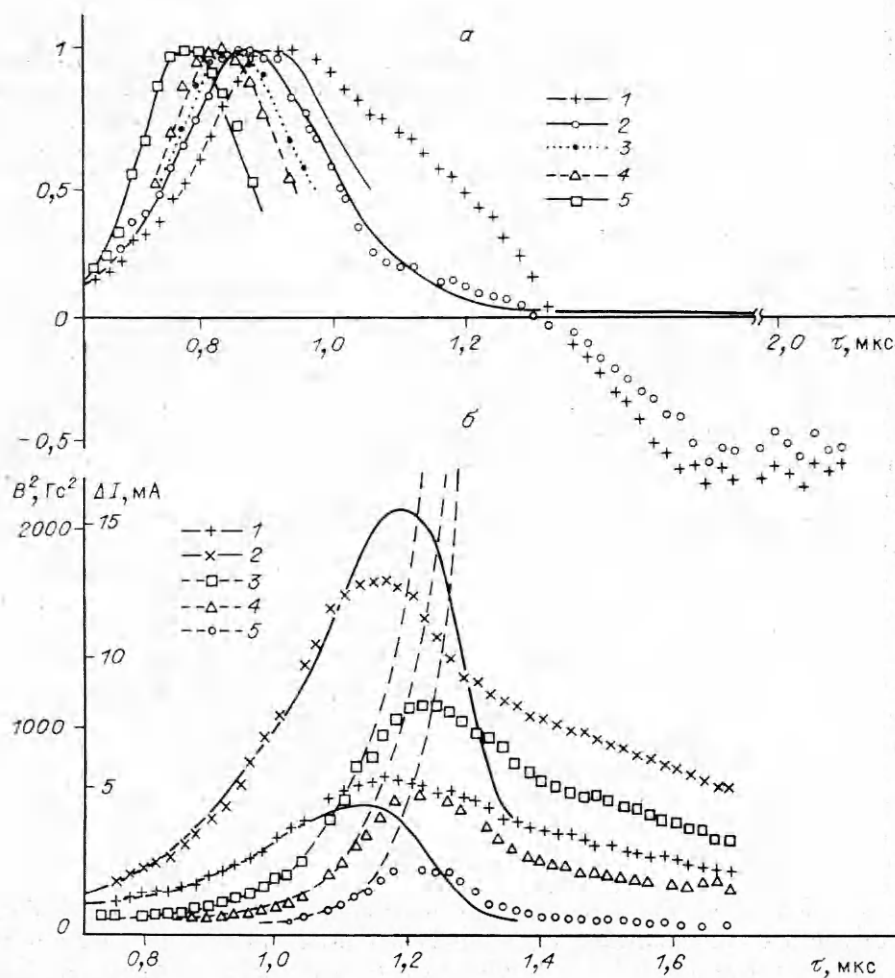


Рис. 1



Р и с. 2

струе были малы [8]. Для создания в струе импульсного электронного тока на экран 5 или на анодную насадку 3 подавался импульс положительного напряжения, создающий в струе в течение 60 нс электронный ток 0,5 А. Действие магнитного поля на плазменную струю фиксировалось по отклику тока пучка на импульсный электронный ток. По скольку за время, когда при взаимодействии электронного тока с магнитным полем создается фокусирующее ионы поле, ионы не успевают переместиться на значительное расстояние, приобретенный ими поперечный импульс будет пропорционален локальному значению этого фокусирующего поля. При дальнейшем разлете ионов в экспандере пространственное распределение поперечных импульсов преобразуется во временную зависимость плотности потока в районе диода и, следовательно, во временную зависимость тока пучка.

На рис. 2, а в относительных единицах изображено изменение тока протонного пучка во времени после подачи на экран 5 (см. рис. 1) импульса положительного напряжения в случаях, когда анод находился от соленоида 4 на расстояниях 1, 2, 3, 4 и 6 см (соответственно 1—5). Время τ отсчитывается от центра импульса. Из значений приращения тока вычтено незначительное возмущение, вызываемое токовым импульсом при нулевом магнитном поле. Из рис. 2, а видно, что заметно ток пучка начинает меняться через 0,5—0,8 мкс после создания импульсного тока. Эта задержка связана со временем пролета ионов от окрестности соленоида до диода. Кривые, аппроксимирующие экспериментальные данные,

построены из следующих предположений. Во-первых, временные зависимости получаются путем перемещения пространственных распределений. Во-вторых, действие на ток пучка фокусирующего поля в каждой точке пропорционально квадрату магнитной индукции в пей. В-третьих, средняя скорость ионов в промежутке 70 мм, отделяющем соленоид от диода, составляет $7,9 \cdot 10^4$, $8,1 \cdot 10^4$, $8,4 \cdot 10^4$, $8,8 \cdot 10^4$ м/с в случаях, относящихся к положениям анода на расстояниях от соленоида 2, 3, 4 и 6 см, а скорости ионов вблизи соленоида равны $5,6 \cdot 10^4$, $6,4 \cdot 10^4$, $7,4 \cdot 10^4$ и $8,2 \times 10^4$ м/с соответственно. Первая величина определяет положение центра кривой, вторая — ширину распределения. Полученные значения скорости протонов находятся в том же диапазоне, что и результаты измерений, выполненных другим методом [10]. Хорошее согласие расчетных данных (кривые на рис. 2) с экспериментальными (точки) показывает, что на расстояниях от анода, больших 1 см, действие фокусирующего ионы поля пропорционально квадрату индукции осевого магнитного поля, а время установления этого поля существенно меньше характерного времени пролета ионов.

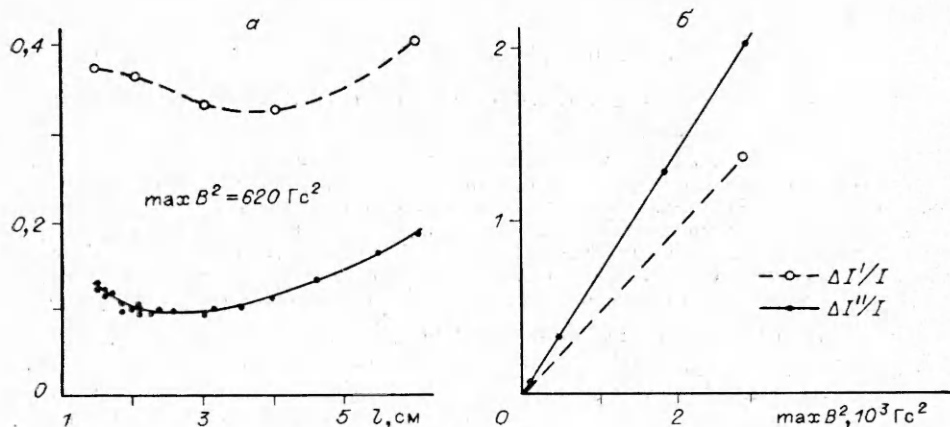
При расстоянии от анода до соленоида менее 1 см отклик пучка на импульсный электронный ток меняется: импульс тока пучка становится асимметричным, так как фронт импульса остается таким же, как и при расстоянии 2 см, а спад импульса делается более пологим (рис. 2, а). Ярче действие магнитного поля в прианодной области проявляется, если вместо соленоида 4 использовать соленоид 2 (см. рис. 1). Возбуждая соленоидом 2 токи Фуко в медном анодном электроде, можно создавать разные конфигурации магнитного поля в прианодной области [8]. На рис. 2, б изображены зависимости тока пучка от времени, аналогичные приведенным на рис. 2, а, но наблюдаемые в условиях, когда импульс положительного напряжения подавался на анодную насадку 3, а магнитное поле разных конфигураций создавалось соленоидом 2. Точки 1—5 получены через 0,5; 1,0; 2,0; 2,2; 2,4 мс после начала импульса тока соленоида. Даны абсолютные значения приращения тока пучка ΔI . Кривые отображают значения квадрата осевого магнитного поля B . Соотношение между пространственной координатой и временем выбрано исходя из скорости протонов в струе $5,6 \cdot 10^4$ м/с. Координата l отсчитывается от торцевой поверхности анода. Как видно из рис. 2, б, экспериментальные точки лежат вблизи соответствующей зависимости квадрата индукции магнитного поля только на расстояниях l , больших 1 см. При меньших расстояниях от анода величина ΔI не коррелирует с пространственным распределением магнитного поля и определяется в основном значением поля на расстоянии 1 см. Вероятно, процессы, создающие фокусирующее поле в прианодной области, имеют большое время установления, так что временная эволюция тока пучка при временных задержках более 1,2 мкс обусловлена процессом релаксации. Вклад этой области в общее фокусирующее воздействие можно оценить, сопоставив результаты импульсных воздействий с приращением тока пучка, вызванным магнитным полем при наличии постоянного электронного тока в плазменной струе.

Относительное изменение протонного тока $\Delta I/I$, вызванное действием магнитного поля на участок плазменной струи, расположенный от анода на расстоянии более 1 см, можно оценить как

$$(1) \quad \Delta I/I = \alpha B^2 \tau,$$

если время протекания электронного тока в струе $\tau = 0,06$ мкс намного меньше времени пролета протоном области действия магнитного поля. На расстоянии $l = 1-3$ см до анода коэффициент $\alpha = (2,1 \pm 0,1) \times 10^3 \text{ с}^{-1} \cdot \text{Гс}^{-2}$, когда электронный ток вытягивается экраном, и $\alpha = (5,8 \pm 0,1) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1} \cdot \text{Гс}^{-2}$, если электронный ток вытягивается анодной насадкой. Используя эти значения α и среднюю скорость протонов v в области действия магнитного поля B , можно по формуле

$$(2) \quad \Delta I'/I = \alpha \int (B^2/v) dl$$



Р и с. 3

найти относительное изменение протонного тока под действием магнитного поля при постоянном электронном токе. На рис. 3 приводятся экспериментальные значения $\Delta I''/I$ при наличии в струе постоянного электронного тока, идущего на экран (рис. 3, а) и на анодную насадку (рис. 3, б). Здесь же даны соответствующие значения $\Delta I'/I$, вычисленные по формуле (2). Видно, что в первом случае рассчитанные значения $\Delta I'/I$ существенно больше экспериментальных, а во втором — намного меньше. Это свидетельствует о том, что значительный вклад в изменение протонного тока дает область, изображенная на рис. 2 справа от штриховой вертикальной линии. В первом случае эта область уменьшает протонный ток (см. рис. 2, а), во втором — увеличивает (рис. 2, б). Когда электронный ток идет на анодную насадку, дополнительное приращение ионного тока пропорционально квадрату индукции осевого магнитного поля на расстоянии от анода 1 см и не зависит от величины магнитного поля внутри этой области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Димов Г. И., Росляков Г. В., Савченко О. Я. Формирование потока ионов и нейтральных атомов из плазмы импульсного дугового источника.— Новосибирск, 1967.— (Препр./АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т ядер. физики; № 145).
2. Димов Г. И., Кононенко Ю. Г., Савченко О. Я., Шамовский В. Г. Получение интенсивных пучков атомов водорода // ЖТФ.— 1968.— Т. 38, вып. 6.
3. Баткин В. И., Гетманов В. Н., Савченко О. Я., Хусаинов Р. А. Диагностика плазменной струи сеточными электродами // ПМТФ.— 1982.— № 6.
4. Давыденко В. И., Димов Г. И., Росляков Г. В. Получение прецизионных ионных и атомных пучков высокой интенсивности // ДАН СССР.— 1983.— Т. 271, № 6.
5. Баткин В. И., Гетманов В. Н., Икрянов И. М., Савченко О. Я. Источник протонов с регулируемым током для электростатического ускорителя // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техника физ. эксперимента.— 1985.— Вып. 1/22.
6. Гетманов В. Н., Савченко О. Я. Импульсный линейный ускоритель протонов // Открытия. Изобретения.— 1989.— № 26.
7. Давыденко В. И., Морозов И. И., Росляков Г. В. Протонный источник инжектора атомов водорода установки АМБАЛ.— Новосибирск, 1980.— (Препр./АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т ядер. физики; № 85-3).
8. Баткин В. И., Савченко О. Я. Влияние слабого магнитного поля в экспандере источника ионов для управления током и профилем пучка // ПТЭ.— 1989.— № 3.
9. Гетманов В. Н., Савченко О. Я. Влияние слабого магнитного поля на интенсивность плазменной струи дугового источника протонов // ПМТФ.— 1987.— № 3.
10. Баткин В. И. Модуляция пучка сеточным электродом в экспандере источника ионов // XI Всесоюз. семинар по линейным ускорителям заряженных частиц, Харьков, 1989: Аннот. докл.

г. Новосибирск

Поступила 8/VIII 1989 г.