

НАГРЕВ ПЛАЗМЫ РЕЛЯТИВИСТСКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

*Ю.И. Абрашитов, В.С. Койдан, В.В. Колюхов,
В.М. Лагунов, В.Н. Лукьянов, К.И. Меклер*

В работе приводятся экспериментальные результаты, свидетельствующие о возможности нагрева достаточно плотной плазмы ($n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$) мощным релятивистским электронным пучком.

Эксперименты проводились на установке "ИНАР". Электронный пучок с начальной энергией 1 Мэв, током $\sim 5 \text{ кА}$ и длительностью 50 + 70 нсек создавался импульсным ускорителем. Диаметр автоэлектронного катода был равен 2 см. Через входную титановую фольгу толщиной 50 мк пучок инжектировался в стеклянную вакуумную камеру ϕ 11 см, в которой с помощью импульсного разряда Пеннинга создавался плазменный шнур ϕ 8 + 9 см с плотностью вплоть до $(3 + 4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Выходной электрод с титановой фольгой 50 мк, который принимал электронный пучок, соединялся с ускорителем четырьмя обратными токопроводами. Дiode ускорителя и плазменная камера располагались в магнитном поле пробочной конфигурации. Катод ускорителя и выходной электрод находились в пробках магнитного поля. Расстояние между пробками 230 см, пробочное отношение 1,7. Магнитное поле на однородном участке достигало 15 кэ. Таким образом, по сравнению с экспериментами [1], наши опыты проводились при существенно большей плотности тока пучка и в почти на порядок большем магнитном поле.

Напряжение на катоде ускорителя измерялось емкостным датчиком. Ток катода и полный ток в плазме регистрировались поясами Роговского. Ток и полная энергия пучка на выходе из плазмы измерялись соот-

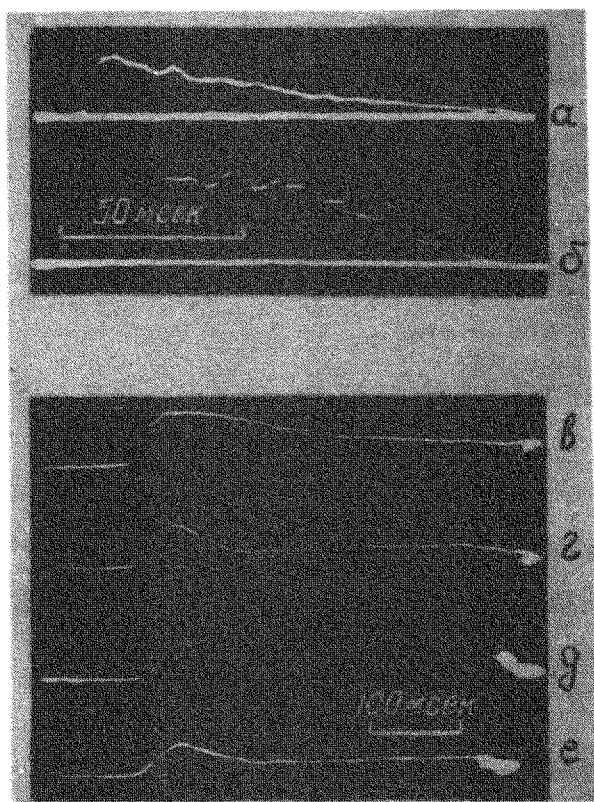


Рис. 1. Типичные осциллограммы: *a* — напряжение на катоде, $U_{\text{кат}} \approx 1 \text{ Мэв}$; *б* — ток пучка, $I_{\text{пуч}} \approx 5 \text{ кА}$; запаздывание выходного тока пучка связано с временем пролета электронов через вакуумную камеру; *в, г, д, е* — проинтегрированные сигналы с диамагнитных зондов, расположенных соответственно на расстояниях 35, 90, 140, 190 см от входа пучка; постоянная интегрирования $RC \approx 1 \text{ мксек}$. Режим: $H_0 = 7 \text{ кэ}$, $n_0 = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$

ответственно шунтом и графитовым калориметром. В отдельных экспериментах для регистрации формы пучка в поперечном сечении за выходной фольгой располагались тонкие пластины полимеров [2]. По потемнению этих пластинок при прохождении через них пучка можно было качественно фиксировать его конфигурацию в зависимости от условий эксперимента. Плотность плазмы определялась по отсечке СВЧ сигналов на длинах волн 2, 4, 18, 30 мм. Поперечное давление плазмы при прохождении пучка регистрировалось четырьмя диамагнитными зондами, расположенными на расстояниях 35, 90, 140, 190 см от входной фольги.

На рис. 1, а и б приведены типичные осциллограммы напряжения на катоде ускорителя и тока пучка на выходе установки. При прохождении пучка в отсутствие плазмы диамагнитные зонды регистрируют сигналы с фронтом нарастания $15 + 30$ $\mu\text{сек}$ и длительностью, примерно равной длительности пучка. Эти сигналы обусловлены диамагнетизмом пучка. Когда пучок проходит через плазму, сигналы увеличиваются по амплитуде в $5 + 7$ раз и их длительность существенно возрастает. На рис. 1 в, г, д, е приведены типичные осциллограммы сигналов с диамагнитных зондов. Чувствительность каналов регистрации была одинакова (с точностью до 20%). Сравнение диамагнитных сигналов на разных зондах показало, что, как правило, наибольший сигнал наблюдается на первом зонде. На третьем и четвертом зондах диамагнитный сигнал примерно в $2 + 3$ раза меньше. Этот факт, по-видимому, указывает на то, что наблюдаемый диамагнетизм не определяется захваченными в магнитную ловушку электронами пучка. В противном случае выравнивание диамагнитных сигналов по амплитуде происходило бы за время пролета электронов пучка через ловушку, которое в наших условиях составляет несколько $\mu\text{сек}$. Следовательно, можно полагать, что диамагнетизм обусловлен нагревом плазмы. Зависимость величины энергосодержания единицы плазменного шнура $nT_e S$ от плотности предварительной плазмы показана на рис. 2. Видно, что вплоть до плотностей плазмы $5 \cdot 10^{13} + 10^{14}$ см^{-3} наблюдается монотонное нарастание величины поперечного давления плазмы. Заметим, что величина плотности, при которой наблюдается максимальный диамагнетизм, почти на два порядка выше, чем в экспериментах [1]. Максимальная величина диамагнетизма достигает значения $nT_e S \approx 3,5 \cdot 10^{17}$ эв \cdot см $^{-1}$. Если предположить, что нагрев происходит только в той области плазменного шнура, через которую проходит пучок ($S \approx 7$ см 2), то $nT_e \approx 5 \cdot 10^{16}$ эв \cdot см $^{-3}$.

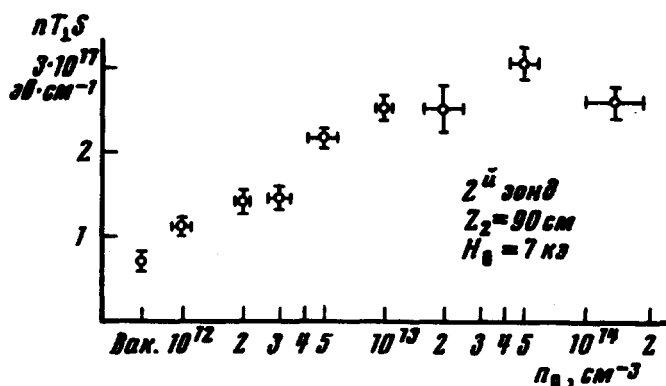


Рис. 2. Зависимость давления плазмы от плотности предварительной плазмы

При плотности плазмы $n \approx 5 \cdot 10^{13}$ см^{-3} это соответствует нагреву плазмы до $T_e \approx 1$ кэв. Определенная по диамагнитным измерениям величина энергии, запасенной во всем плазменном шнуре после прохождения пучка, составляет $10 + 15\%$ от полной энергии пучка.

После прохождения пучка через неп полностью ионизованную плазму наблюдается дополнительная ионизация нейтралов с характерным временем ~ 500 нсек. Такая ионизация может быть вызвана электронами плазмы, нагретыми до температуры ~ 1 кэв. Эта величина удовлетворительно согласуется с оценками температуры по диамагнитным измерениям.

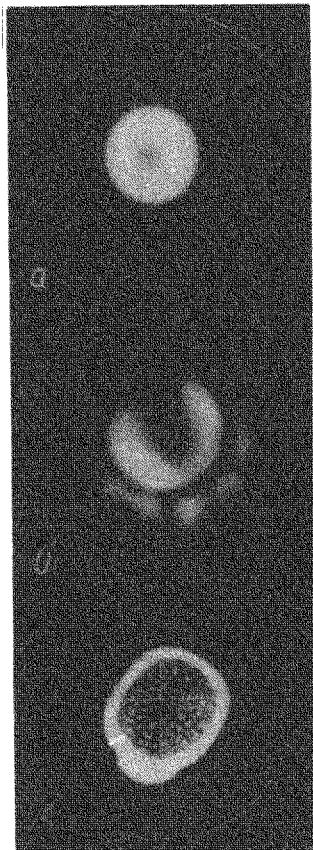


Рис. 3. Форма пучка в поперечном сечении: *a* — вакуум, *б* — плазма с плотностью $n = 10^{12} \text{ см}^{-3}$

Давление плазмы при заданной плотности возрастает в несколько раз с увеличением магнитного поля от 3 до 15 кэ. Этот факт согласуется с качественными теоретическими оценками, приведенными в [1].

С помощью пластинок из полимеров было обнаружено, что при прохождении через вакуум ($P_{\text{ост}} = 10^{-6}$ мм рт. ст.) пучок на выходе имеет симметричную форму с диаметром $\sim 2,5$ см (рис. 3, *a*). Если пучок проходит через плазму, то он может заметно отклоняться и одновременно уширяться (вообще говоря, неравномерно как в радиальном, так и в азимутальном направлениях). Особенно сильно пучок уширяется и отклоняется при плотностях $10^{12} + 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (рис. 3, *б*). В этом режиме размытие пучка настолько велико, что не исключено его частичное попадание на стенки вакуумной камеры. При этом естественно, калориметр на выходе будет фиксировать большие (до 50 + 70%) потери энергии. Таким поведением пучка может в определенной мере объясняться наблюдавшаяся ранее величина энергетических потерь и их зависимость от плотности

плазмы [1, 3]. При больших плотностях плазмы ($n = 10^{13} \text{ см}^{-3}$) наблюдается, как правило, небольшое уширение пучка (рис. 3, в). Одной из возможных причин такого размытия пучка может быть неоднородность распределения обратного тока по сечению плазменного шнура, вызванное в свою очередь неоднородностью плазмы.

Эксперименты по измерению полного тока в плазме при прохождении пучка показали, что ток пучка при плотности плазмы $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ практически не компенсируется обратным током. Если $n \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$, то компенсация пучка наблюдается на переднем фронте; на спаде тока пучка обратный ток направлен в ту же сторону, что и пучок, происходит даже затягивание полного тока по сравнению с током пучка. При $n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ток пучка практически все время скомпенсирован обратным током, что свидетельствует о высокой проводимости плазмы.

Авторы искренне благодарны Г.И.Будкеру, Д.Д.Рютову, Э.П.Круглякову за интерес к работе; О.П.Соболеву, Г.И.Шульженко за помощь при измерениях.

Институт ядерной физики
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
25 июля 1973 г.

Литература

- [1] А.Т.Алтынцев, Б.Н.Брейзман, А.Г.Еськов, О.А.Золотовский, В.И.Коротеев, Р.Х.Куртмулаев, В.Л.Масалов, Д.Д.Рютов, В.Н.Семенов
Plasma Physics and Control. Nuclear Fusion Research, IAEA,
Vienna, 2, 309, 1971.
- [2] Б.П.Санников. Тезисы симпозиума по эмиссионной плазменной
сильноточной электронике. Томск, 1973.
- [3] V. S. Koydan, V. M. La gunov, V. N. Lukyanov, K. I. Mekler, O. P. So-
bolev. Fifth Europ. Conf. on Control. Fusion and Plasma Physics.
Grenoble, 1, 161, 1972.