

УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ПЛАЗМОЙ

*А.В.Аржанников, А.В.Бурдаков, В.С.Койдан
В.В.Конюхов, К.И.Меклер, А.И.Рогозин*

Приводятся экспериментальные результаты, свидетельствующие о значительном увеличении эффективности взаимодействия сильноточного релятивистского электронного пучка с плазмой при уменьшении углового разброса пучка и увеличении внешнего магнитного поля.

Известно, что эффективность передачи энергии при прохождении сильноточного РЭП через плазменный шнур составляет $5 + 7\%$ на метр при плотности плазмы $n \approx 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и типичных значениях плотности тока пучка $\sim 1 \text{ ка/см}^2$, а энергии $\sim 1 \text{ Мэв}$ (см., например, [1]). При увеличении плотности исходной плазмы эффективность взаимодействия уменьшается, что наблюдалось в ряде экспериментов [1 — 4]. В связи с этим представляется актуальным, особенно с точки зрения термоядерных приложений, поиск способов повышения доли энергии пучка, передаваемой более плотной плазме.

Из теории (см., например, [5]) известно, что инкремент пучковой неустойчивости увеличивается с уменьшением углового разброса пучка, соответственно, может уменьшаться длина релаксации пучка в плазме. Угловой разброс электронов сильноточного РЭП в значительной мере определяется толщиной и материалом анодной фольги, через которую пучок инжектируется в плазму. Кроме того, вклад в эту величину может вносить угловая расходимость, обусловленная неколлинеарностью электрического и внешнего продольного магнитного полей в диоде ускорителя, а также влиянием собственного магнитного поля пучка. Поэтому целесообразна постановка экспериментов по нагреву плазмы с помощью РЭП при инжекции пучка через фольги минимально возможной толщины и в максимально возможном продольном магнитном поле.

Эксперименты проводились на установке "ИНАР", схема которой и методы измерений описаны в работах [1, 6, 7]. В этой серии экспериментов параметры РЭП были следующие: энергия $0,8 \text{ Мэв}$, максимальный ток пучка 20 ка , длительность 50 нсек , диаметр пучка на входе 4 см . Измерения проводились при плотности предварительной плазмы $n = (3 + 5) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, магнитное поле на однородном участке могло изменяться в пределах $H_0 = 5 + 25 \text{ кэ}$, пробочное отношение $1,7$ (поле в области диода достигало 42 кэ). Толщина анодной фольги d из титана изменялась в пределах $50 + 6 \text{ мкм}$.

Диаманитные измерения показали, что уменьшение углового разброса пучка $(\theta^2)^{1/2}$ (путем уменьшения толщины анодной фольги) приводит как к существенному повышению полного энергосодержания в плазме, так и к появлению сильной неравномерности энергосодержания по дли-

не плазменного шнура (см. рис. 1). Как видно, сигнал с ближайшего к анодной фольге диамантового датчика ($z = 25 \text{ см}$) возрастает более чем в 10 раз при уменьшении d от 50 до 6 мкм ($(\theta^2)^{1/2}$ уменьшается при этом с 24 до 7°). Сигналы с более удаленных от входа пучка датчиков также возрастают, хотя и в меньшей мере¹⁾.

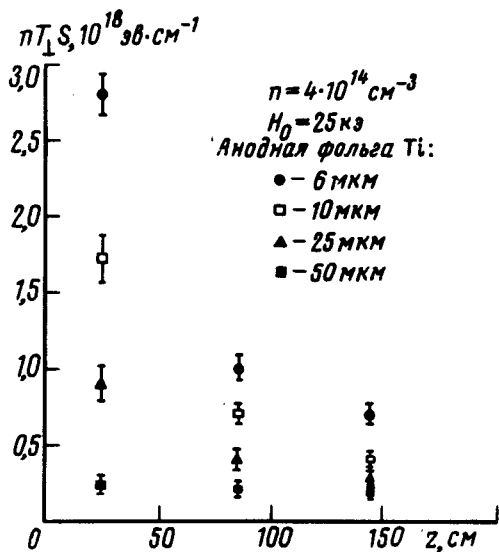


Рис. 1. Распределение поперечной энергии плазмы по длине плазменного шнура при различных толщинах анодной фольги

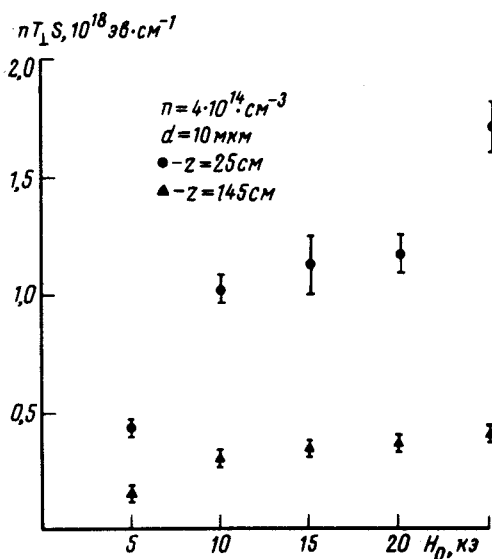


Рис. 2. Зависимость поперечной энергии плазменного шнура от напряженности продольного магнитного поля

¹⁾ Вообще говоря, изменение толщины входной фольги от 50 до 6 мкм приводит к увеличению амплитуды инжектируемого тока на несколько процентов; а полной энергии пучка почти на 20%. Эти изменения входных параметров РЭП измерялись в эксперименте и учитывались при обработке результатов.

На рис. 2 представлена зависимость величины поперечной энергии плазмы $nT_{\perp}S$ от напряженности продольного магнитного поля. Видно, что с увеличением магнитного поля поперечная энергия плазмы возрастает, причем вблизи от входа пучка ($z = 25$ см) растет более быстро, чем на большем расстоянии ($z = 145$ см). В целом, изменение H_0 с 5 до 25 кэ приводит к увеличению полной энергии, передаваемой плазме, примерно в три раза. Такое увеличение энергопередачи может происходить в результате улучшения угловых характеристик пучка с ростом продольного магнитного поля, что особенно существенно при тонких входных фольгах. Наряду с этим возможно и непосредственное влияние магнитного поля на интенсивность взаимодействия РЭП с плазмой.

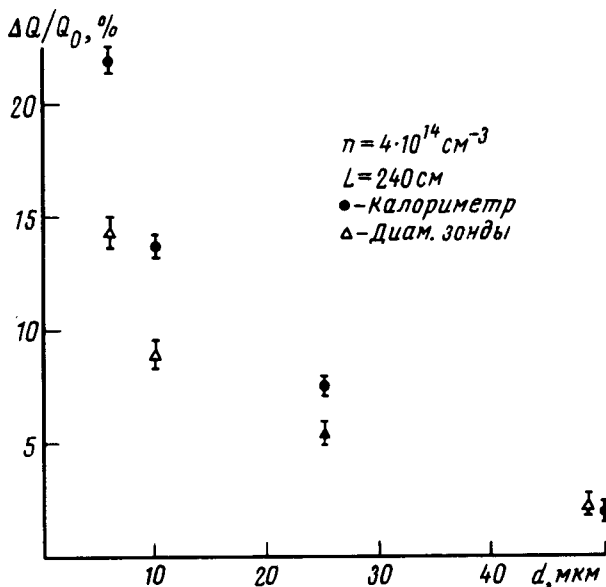


Рис. 3. Зависимость эффективности взаимодействия РЭП с плазмой от толщины анодной фольги

Зависимости энерговыделения РЭП в плазме от d и H_0 , полученные с помощью диамагнитных измерений, согласуются с результатами калориметрических измерений потерь полной энергии пучка. На рис. 3 показаны зависимости потерь энергии пучка и передаваемой плазме энергии, отнесенных к полной энергии пучка на входе, от толщины анодной фольги. Потери энергии определялись путем поочередного измерения одним и тем же калориметром входной и выходной энергии пучка. В исследуемом режиме при прохождении пучка через плазму сохранялся его полный заряд, так что регистрируемые калориметром потери энергии пучка связаны с торможением РЭП. Как видно из рис. 3, потери энергии пучка быстро возрастают с уменьшением d и при $d = 6$ мкм достигают 22% (при полной начальной энергии РЭП $Q_0 = 500$ дж). Из диамагнитных измерений следует, что при этих же условиях в плазменном столбе запасается энергия $\Delta Q \approx 75$ дж (в предположении равномерного распределения кинетической энергии частиц плазмы по степеням свободы), что составляет около 15% от исходного энергозапаса пучка. Некоторое различие, особенно при тонких фольгах, между величинами $\Delta Q/Q_0$, определенными по калориметрическим и диамагнитным измерениям, может быть объяснено наличием потерь энергии из плазмы в процессе нагрева, а также его неизотропностью.

Как было показано ранее [8], при плотности плазмы $\gtrsim 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ наблюдается полная компенсация пучка не только по току и заряду, но и по плотности тока. В описываемых экспериментах также контролировалась токовая компенсация пучка, и она всегда была полной. Поэтому наблюдаемая передача энергии от пучка к плазме не может быть обусловлена диссипацией энергии обратного тока. Сильная зависимость энерговыделения в плазме от углового разброса пучка, а также неравномерность его по длине установки указывает на то, что в данном случае основную роль играет пучковая неустойчивость.

Таким образом, при плотности плазмы $n = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ достигнута эффективность передачи энергии сильноточного РЭП плазме $\Delta Q/Q_0 \approx 20\%$ на длине плазменного шнура $L = 240 \text{ см}$.

Авторы благодарны Д.Д.Рютову за полезные обсуждения.

Институт ядерной физики
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
2 декабря 1977 г.

Литература

- [1] Ю.И.Абрашитов, В.С.Койдан, В.В.Конюхов, В.М.Лагунов, В.Н.Лукьянов, К.И.Меклер. Письма в ЖЭТФ, **18**, 675, 1973.
- [2] А.Т.Алтынцев, А.Г.Еськов, О.А.Золотовский, В.И.Коротеев, Р.Х.Куртмулаев, В.Л.Масалов, В.Н.Семенов. Письма в ЖЭТФ, **13**, 197, 1971.
- [3] С.А.Капетанакос, Д.А.Хаммер. Appl. Phys. Lett., **23**, 17, 1973.
- [4] С.Еkdahl, М.Greenspan, Р.Е.Kribel, J.Sethian, С.В.Wharton. Phys. Rev. Lett., **33**, 346, 1974.
- [5] Б.Н.Брейзман, Д.Д.Рютов. Nucl. Fusion, **14**, 873, 1974.
- [6] Ю.И.Абрашитов, В.С.Койдан, В.В.Конюхов, В.М.Лагунов, В.Н.Лукьянов, К.И.Меклер, Д.Д.Рютов. ЖЭТФ, **66**, 1324, 1974.
- [7] А.В.Аржанников, Б.Н.Брейзман, Л.Н.Вячеславов, В.С.Койдан, В.В.Конюхов, Д.Д.Рютов. Plasma Physics and Contr. Nucl. Fusion Research, IAEA, Vienna, **3**, 257, 1975.
- [8] A.V.Arzhannikov, V.S.Koidan. Proc. 12-th Inter. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Eindhoven, **1**, 278, 1975.