

15

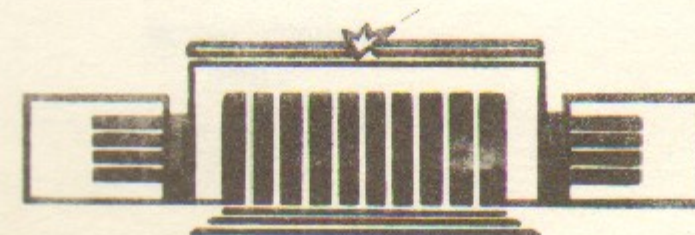


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

С.Г. Воропаев, Б.А. Князев, В.С. Койдан,
В.В. Конохов, С.В. Лебедев, К.И. Меклер,
В.В. Чикунов, М.А. Щеглов

МАГНИТНАЯ КОМПРЕССИЯ МОЩНОГО
РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО
ПУЧКА МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

ПРЕПРИНТ 84-121



НОВОСИБИРСК

МАГНИТНАЯ КОМПРЕССИЯ МОЩНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

С.Г.Воропаев, Б.А.Князев, В.С.Койдан, В.В.Конюхов,
С.В.Лебедев, К.И.Меклер, В.В.Чикунов, М.А.Щеглов

А Н Н О Т А Ц И Я

Сообщается об экспериментах по сжатию мощного релятивистского электронного пучка ($\mathcal{E} = 600-800$ кэВ, $\tau = 3-5$ мкс) с полным энергезапасом 50 кДж при его транспортировке в магнитном поле пробочной конфигурации в нейтральном газе. Осуществлено сжатие в 20 раз ($\varphi_{\min} = 4$ см, $j_{\max} = 3$ кА/см²).

MAGNETIC FOCUSING OF A POWERFUL MICROSECOND REB

S.G.Voropaev, B.A.Knyazev, V.S.Koidan, V.V.Konyukhov,
S.V.Lebedev, K.I.Mekler, V.V.Chikunov, M.A.Sheglov

The experiments on focusing, in neutral gas, of a high-power REB ($\mathcal{E} = 600-800$ keV, $\tau = 3-5$ sec) with 50 kJ total energy by a mirror magnetic field are described. A 20-fold beam compression was achieved ($\varphi_{\min} = 4$ cm, $j_{\max} = 3$ kA/cm²).

Для эффективного нагрева плазмы в открытых ловушках могут быть использованы мощные релятивистские электронные пучки (РЭП) микросекундной длительности с плотностью тока не менее $2-3 \text{ кА/см}^2$ [1]. Одним из способов получения таких пучков является генерация пучка в плоском или бесфольговом диоде при низкой плотности тока с его последующим сжатием [2]. В данной работе сообщается об экспериментах по магнитному сжатию электронного пучка ускорителя У-1 [3,4]. Эксперименты по сжатию проводились ранее с пучками наносекундной длительности и, к тому же, существенно меньшей энергоемкости (см., например, [5,6]). Увеличение длительности импульса на два порядка может качественно изменить картину сжатия и транспортировки пучка.

Схема эксперимента показана на рис.1. Пучок генерируется в квазиплоском диоде с графитовым катодом 1 диаметром 18 см. На рис.2а,г приведены осциллограммы напряжения на диоде U и тока пучка I_2 , полученные в режиме, когда пучок поглощался в массивном коллекторе из нержавеющей стали 4, помещаемом на расстоянии 1 см за анодной фольгой 2 ("режим работы на коллектор"). Длительность импульса определялась временем заполнения диода плазмой, причем до момента закорачивания диода энергия электронов соответствует приложенному напряжению [4]. Плотность тока пучка в максимуме не превышает $0,2 \text{ кА/см}^2$.

Сжатие пучка осуществлялось в магнитном поле пробочной конфигурации, нараставшем от 0,6 Тл в диоде ускорителя до 12 Тл в центральной катушке 6. Измерение энергосодержания пучка Q , прошедшего через систему сжатия, производилось графитовым калориметром 8, расположенным в вакуумном объеме, отделенном от камеры сжатия алюминиевой фольгой 7 толщиной 30 мкм. Расстояние между фольгами 2 и 7 составляло $e = 52 \text{ см}$. Рабочее давление газа в камере сжатия могло меняться от $3 \cdot 10^{-5} \text{ Тор}$ (остаточный вакуум) до 1 Тор аргона. Пояса П2 и П5 измеряли, соответственно, ток входящего в камеру сжатия пучка I_2 и ток пучка I_5 , вышедшего из камеры. Пояса П3 и П4 регистрировали полный ток, складывающийся из тока РЭП и обратного тока в образующейся плазме, в левой I_3 и правой I_4 частях камеры сжатия. Диаметр пучка в экспериментах контролировался по отверстиям, образующимся в фольгах 2,5 и 7*, а также микрофотометрированием сним-

* Фольга 5 из титана толщиной 50 мкм помещалась только в отдельных контрольных выстрелах.

ков, полученных электронно-оптическим преобразователем (см. рис.1). В экспериментах по компрессии пучка расстояние анод-катод d составляло 7,5 см или 5 см. В качестве анодной фольги 2 использовался алюминированный (толщина покрытия $\sim 0,5$ мкм) лавсан толщиной 10 мкм.

Основные результаты экспериментов сводятся к следующему (см. рис.2).

1. Токи РЭП на входе и выходе камеры сжатия всегда равны до момента закорачивания диода ($I_2 = I_3$), т.е. поперечные потери отсутствуют. Диаметр пучка на входе равен диаметру катода и далее соответствует ходу силовых линий магнитного поля, уменьшаясь до 4 см в максимуме магнитного поля.

2. Ток пучка, проходящий через камеру сжатия, превышал критический вакуумный ток (в нашем случае ~ 10 кА), что свидетельствует о появлении плазмы и нейтрализации пространственного заряда пучка. Начиная с некоторого момента в плазме возникает обратный ток, равный $I_3 - I_2$. Задержка появления обратного тока уменьшается с ростом давления газа (рис.2б и в).

Простые оценки позволяют представить следующую картину процессов. Электроны пучка проходят через газ и ионизуют его. При давлении 10^{-2} Тор и выше даже прямая ионизация способна обеспечить нейтрализацию пространственного заряда пучка за времени 0,1 мкс. При меньших давлениях газа нейтрализация может быть обеспечена лавинной ионизацией в поле, образуемом пространственным зарядом пучка. Поддержание обратного тока в плазме и дальнейшая ионизация обеспечивается индукционным полем, связанным с нарастанием полного тока в системе: $E_{ind} \sim \frac{L}{c} \frac{dI}{dt} \sim \sim 30 \frac{В}{см}$, где L - индуктивность контура тока. Полный ток, сохраняющийся в газе после его ионизации обусловлен захваченным в системе магнитным потоком.

3. При прохождении пучка через магнитную пробку ("режим сжатия") режим работы диода заметно изменяется по сравнению с "режимом работы на коллектор". Во-первых, ток пучка становится меньше, а напряжение выше. Во-вторых, как правило, наблюдается преждевременное закорачивание диода. При неизменных начальных условиях ($d = 5$ см, $p = 10^{-2}$ Тор) время закорачивания диода от выстрела к выстрелу менялось от 1,5 до 3 мкс и коррелировало (в данной серии) с достижением током пучка величины, близкой к 40 кА.

Изменение режима работы диода связано, скорее всего, с отражением части электронов от магнитной пробки и их осцилляциями сквозь анодную фольгу. При пробочном отношении 20 от магнитной пробки отражаются электроны, имеющие на входе в камеру сжатия пичч-угол, превышающий 13° . Пичч-угол электронов пучка, обусловленный в основном рассеянием в фольге и изломом силовых линий магнитного поля на входе в плазму, возрастает к концу импульса вследствие уменьшения напряжения на диоде и увеличения разности токов $I_2 - I_3$. Дополнительным источником углового разброса может быть возникновение, начиная с некоторой плотности тока, коллективного пучково-плазменного взаимодействия. Преднамеренное увеличение числа отраженных электронов заменой лавсановой фольги на алюминированную толщиной 10 мкм (что увеличивает $(\bar{\theta}^2)^{1/2}$ в фольге с 2° до 7° при энергии электронов 500 КэВ) или помещением в магнитную пробку пластины из тантала, имеющего высокое альбедо для пучковых электронов, приводит к еще более раннему закорачиванию диода.

4. Энергосодержание пучка, прошедшего через область сжатия, определялось временем работы диода до закорачивания и в серии экспериментов при $d = 5$ см и $p = 10^{-2}$ Тор составляло 50-90% от энергосодержания пучка в режиме работы на коллектор ($Q = 52$ кДж).

Результаты работы свидетельствуют о возможности эффективной магнитной компрессии микросекундного РЭП, генерируемого в квазиплоском диоде. Полученные параметры сжатого пучка (максимальное энергосодержание 46 кДж, диаметр 4 см, плотность тока 3 кА/см²) позволяют использовать его для экспериментов по нагреву плазмы в открытых ловушках.

Авторы искренне признательны Д.Д.Рятову за полезные советы и обсуждения на всех этапах работы, А.И.Горбовскому и В.С.Николаеву за конструирование основных экспериментальных узлов, В.Е.Некипалову, Б.С.Симоненко, М.В.Сомову и С.М.Туркину за помощь в подготовке эксперимента.

Л и т е р а т у р а :

1. V.S.Koidan, E.P.Kruglyakov, D.D.Ryutov. - Proc. of the 4th Int. Topical Conf. on High-Power Electron and Ion Beam Research and Technology, Palaiseau, v.2, 531 (1981).
2. Д.Д.Рютов. - В сб.: "Вопросы атомной науки и техники". Сер. Термоядерный синтез. М., вып. I-2, 96 (1978).
3. С.В.Лебедев, В.В.Чикунов, М.А.Щеглов. - Письма в ЖТФ, 8, 693, (1982).
4. Воропаев С.Г., Койдан В.С., Лебедев С.В., Николаев В.С., Чикунов В.В., Щеглов М.А. ДАН СССР, 276, III (1984).
5. P.E.Bolduc, E.L.Patterson. - J.Appl. Phys., 43, 4006 (1972).
6. C.Stallings, J.Benford, K.Childers. - Plasma Physics, 18, 317 (1976).

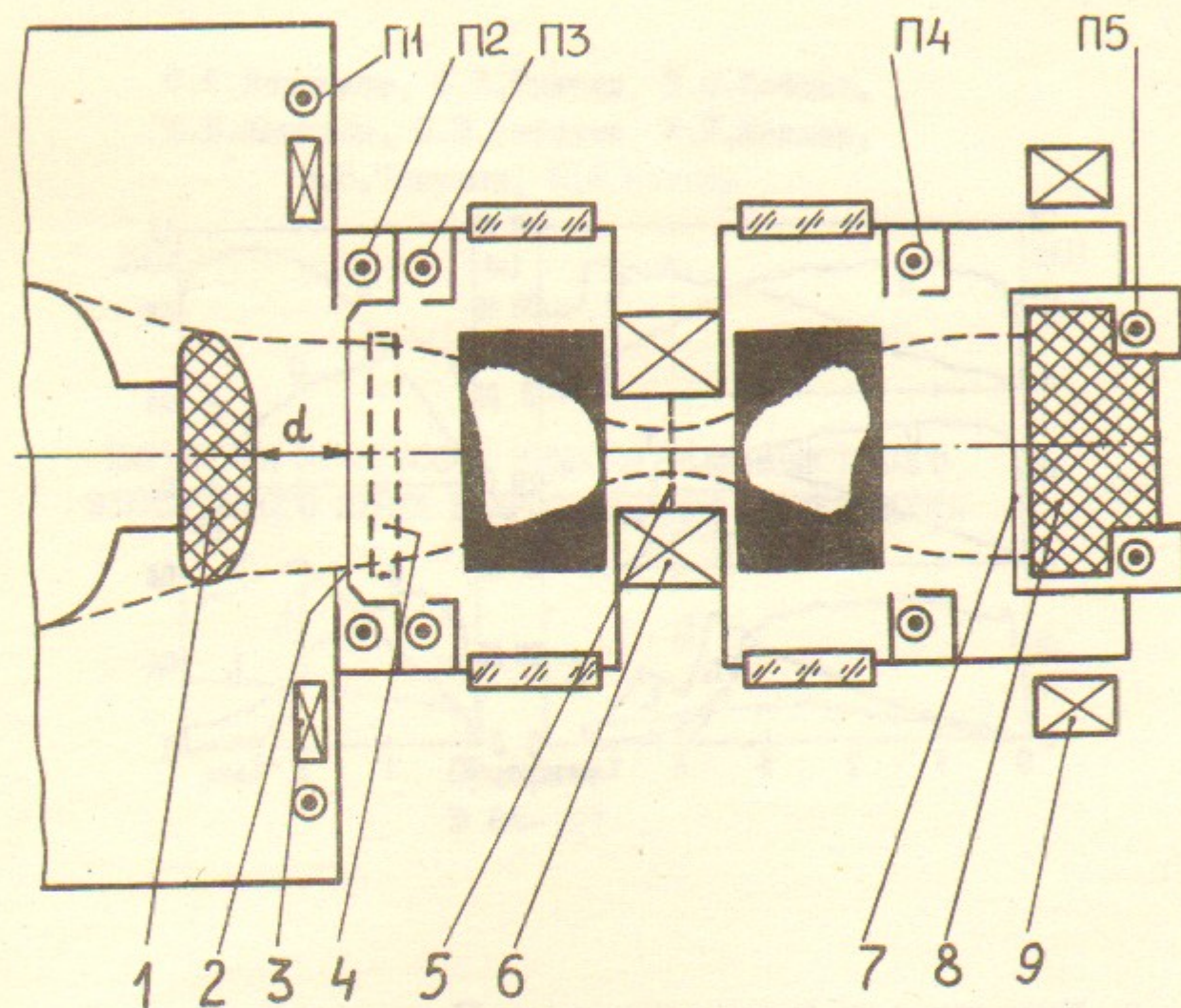


Рис. I. Схема эксперимента. Фотография - свечение газа, снятое ЗОП'ом (экспозиция $\Delta t = 0,5$ мкс) в момент замыкания диода ($p(\text{Ar}) = 10^{-2}$ Тор). 3, 6 и 9 - катушки магнитного поля. Пунктир - силовые линии магнитного поля.

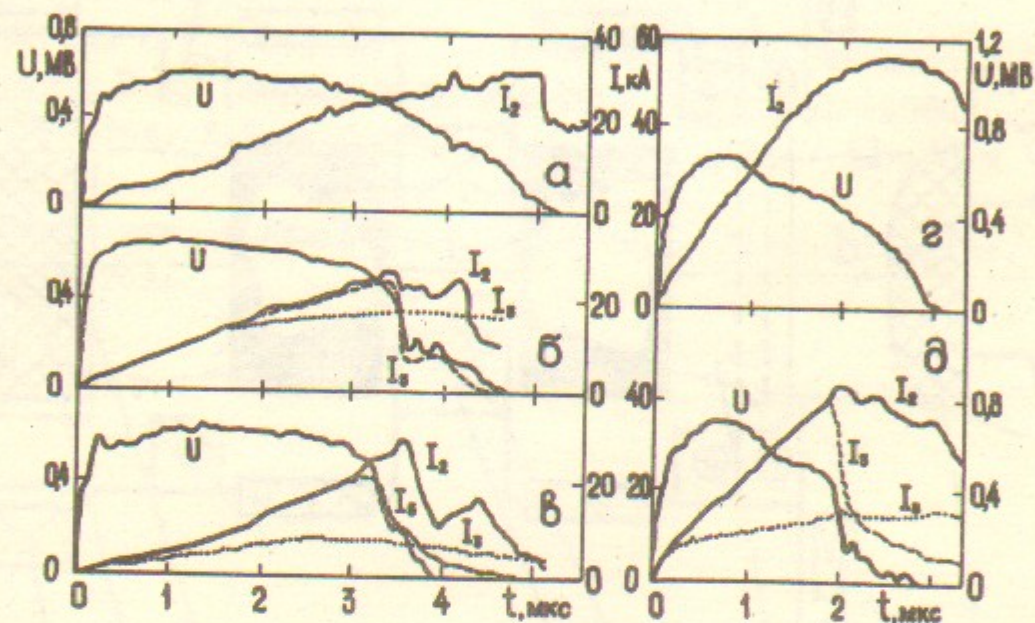


Рис.2. Напряжение на диоде ускорителя U и токи I , регистрируемые поясами Роговского (а, б, в - $d = 7,5$ см; г, д, $d = 5$ см); а и г - пучок принимается коллектором, расположенным в вакууме за фольгой 2; б, в, д - пучок проходит через магнитную пробку. Давление аргона: б - 10^{-4} Тор, в - 10^{-1} Тор, д - 10^{-2} Тор.

С.Г.Воропаев, Б.А.Князев, В.С.Койдан,
В.В.Конюхов, С.В.Лебедев, К.И.Меклер,
В.В.Чикунев, М.А.Щеглов

МАГНИТНАЯ КОМПРЕССИЯ МОЩНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Препринт
№ 84-121

Работа поступила - 12 апреля 1984 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 13.9-84 г. МН 04532
Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.0,8 печ.л., 0,7 учетно-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 121.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90