

40

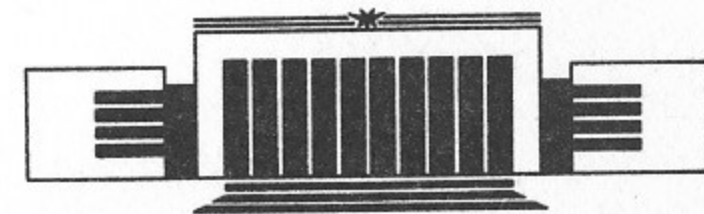


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

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

**ПОЛУЧЕНИЕ МОЩНОГО
МИКРОСЕКУНДНОГО РЭП
С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ТОКА**

ПРЕПРИНТ 86-177



НОВОСИБИРСК

High-Power Microsecond REB
with a High Current Density

S.G. Voropajev, B.A. Knyazev, V.S. Koidan,
V.V. Konyukhov, S.V. Lebedev, K.I. Mekler,
V.S. Nikolajev, A.V. Smirnov,
V.V. Chikunov, M.A. Shcheglov

ABSTRACT

1 MeV-4 μ sec-relativistic electron beam with 130 kJ total energy for a pulse has been generated at the U-1 accelerator. The beam has been magnetically-focused by longitudinal injection into a magnetic mirror with the mirror ratio equal to 20. The compressed beam of 4 cm diam, 100 kJ total energy, and current density up to 5 kA/cm² was obtained in the midplane of the mirror.

АННОТАЦИЯ

Сообщается о получении на ускорителе У-1 релятивистского электронного пучка ($U_e=1$ МэВ) с полным энергосодержанием 130 кДж при длительности импульса 4 мкс. При инжекции в продольное нарастающее магнитное поле (пробочное отношение—20) получен сжатый пучок диаметром 4 см с плотностью тока до 5 кА/см² и полным энергосодержанием 100 кДж.

Для решения проблем управляемого термоядерного синтеза, в частности, для нагрева плазмы в соленоидах [1], значительный интерес представляют сильноточные релятивистские электронные пучки (РЭП) микросекундной длительности с большим энергосодержанием. На установке У-1 [2, 3] ведутся работы по получению однородного по сечению пучка с высокой плотностью тока путем генерации его в квазиплоском диоде с последующей магнитной компрессией [4, 5].

В настоящей работе сообщается об экспериментах, в которых был получен РЭП микросекундной длительности с плотностью тока до 5 кА/см^2 и энергосодержанием 100 кДж .

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Пучок генерировался в диоде с графитовым катодом 1 диаметром $21,5 \text{ см}$. Расстояние между катодом и анодной фольгой 2 составляло 9 см . В качестве анодной фольги использовалась 10 мкм лавсановая пленка с двусторонним алюминиевым покрытием. Сжатие пучка осуществлялось магнитным полем пробочной конфигурации ($0,5 \text{ Тл}$ на анодной фольге и 10 Тл в пробке внутри катушки 5). Энергосодержание Q пучка, прошедшего через магнитную пробку, измерялось графитовым калориметром 8. Расстояние между фольгами 2 и 7 составляло 55 см . Давление в камере сжатия (в пространстве между фольгами 2 и 7) могло изменяться от 10^{-5} до 1 Тор . Пояса Роговского Π_2 и Π_5 измеряли ток пучка на входе (I_2) и на выходе (I_5) камеры сжатия. Пояса Π_3 и Π_4 регистрировали полный ток, складывающийся из тока пучка и обратного тока в образующейся плазме. Пояс Π_1 регистрировал ток в диоде.

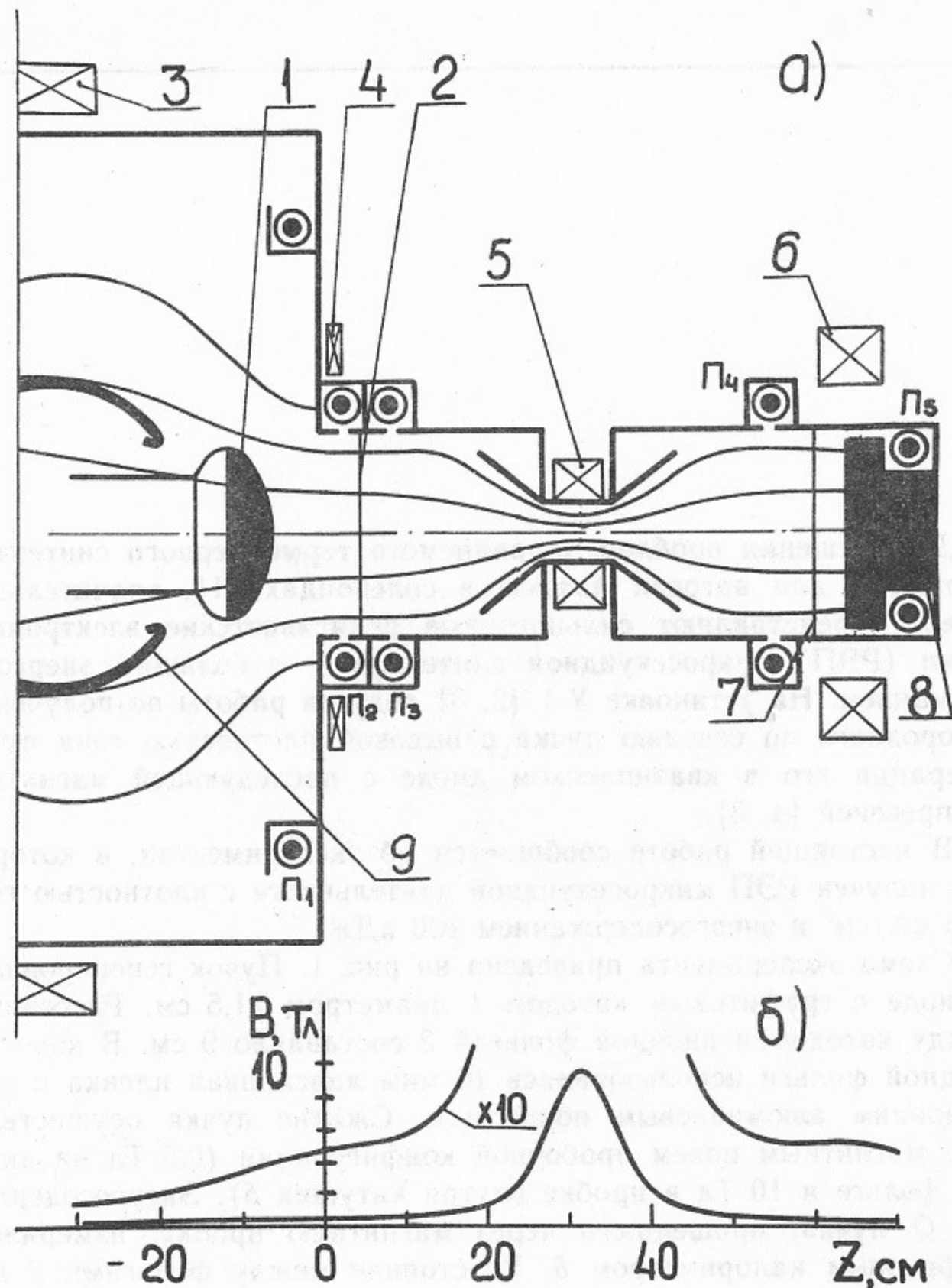


Рис. 1. Схема эксперимента:

а) 1—графитовый катод; 2—анодная фольга; 3—6—катушки, формирующие магнитное поле (тонкие линии—силовые линии магнитного поля); 7—фольга; 8—графитовый калориметр; 9—экранирующий катодный электрод. б) Величина магнитной индукции вдоль оси установки.

Параметры пучка, генерируемого в диоде, были повышены по сравнению с [3, 5] за счет изменения конструкции диодного узла. Увеличение диаметра диодной камеры с 70 до 100 см и изменение конфигурации экранирующего электрода 9 позволили снизить напряженность электрического поля на его поверхности. В результате удалось существенно уменьшить потери энергии, связанные с током утечки с экранирующего электрода назад, по силовым линиям поля (см. [3]). Максимальное энергосодержание пучка в диоде было доведено до $Q = 130$ кДж (осциллограммы напряжения на диоде и токов в системе приведены на рис. 2,а) при исходном энергозапасе в ГИН'е $CU^2/2 = 230$ кДж. Указанное значение Q было измерено калориметром 8, располагаемым в этих экспериментах сразу после анодной фольги 2 (система компрессии в этом случае отсоединялась от ускорителя). Отметим, что величина Q с точностью до нескольких процентов совпадала с вычисленным по осциллограммам значением $\int I_{\text{п}} U dt$ ($I_{\text{п}}$ —ток пучка на калориметр). Полная энергия, выделяющаяся в диодной камере $Q_{\text{Г}} = \int I_{\text{Г}} U dt$ ($I_{\text{Г}}$ —ток генератора, измеряющийся на входе в диодную камеру см. [3]) составляла при этом 155 кДж.

Эксперименты по магнитной компрессии были проведены при несколько более низких параметрах исходного пучка. Характеристики пучка, генерируемого в диоде, измерялись в этой серии экспериментов в «режиме работы на коллектор», т. е. пучок принимался графитовым коллектором, располагаемым непосредственно за анодной фольгой 2. Осциллограммы тока I_2 на коллектор и напряжения U на диоде в этом режиме приведены на рис. 2,б. Напряжение на диоде достигает 1 МВ, ток пучка 60 кА, длительность импульса—4,5 мкс. Энергосодержание пучка $Q_1 = \int I_2 U dt$ составляет 110 кДж.

На рис. 2,в приведены осциллограммы, полученные в режиме компрессии. Видно, что форма импульса напряжения практически не изменилась по сравнению с «коллекторным» режимом, но закорачивание диода происходит в более ранний момент времени. В течение всего импульса напряжения ток I_5 пучка, прошедшего через магнитную пробку, совпадает в пределах точности измерений ($\sim 5\%$) с входным током I_2 . Ток пучка на выходе достигает 60 кА, диаметр пучка в пробке составляет 4 см, а соответствующая величина плотности тока 5 кА/см^2 . Энергосодержание сжатого пучка Q_2 , определенное по показаниям калориметра, а также по интегралу $\int I_5 U dt$, составляет 100 кДж. Эффективность компрессии, т. е. отношение Q_2/Q_1 определяется временем работы ди-

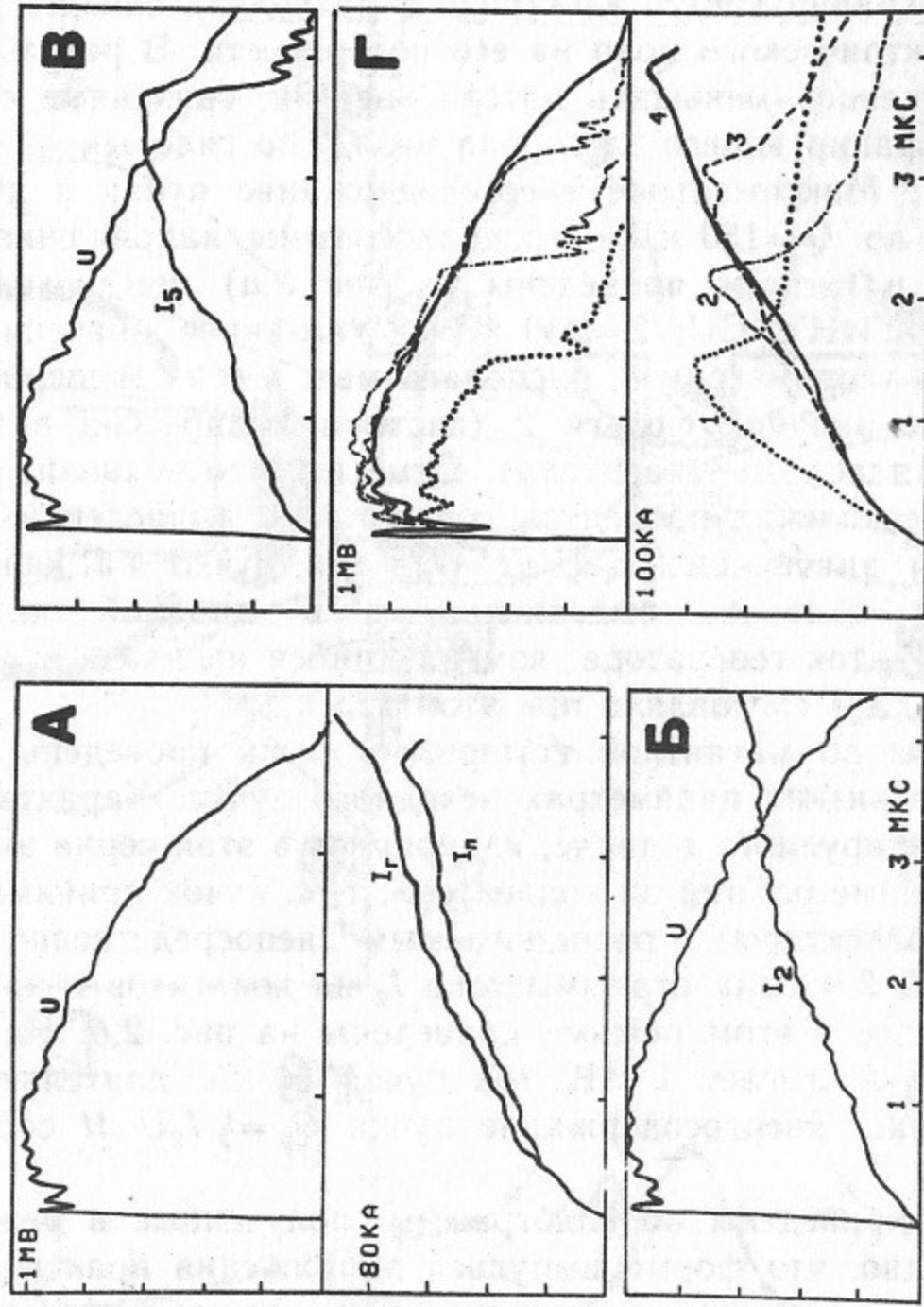


Рис. 2. Осциллограммы напряжения U на диоде и токов I :
 а) пучок принимается калориметром δ , установленным вместо камеры сжатия; б) пучок принимается коллектором, расположенным сразу за анодной фольгой 2; в) пучок проходит через систему сжатия; г) напряжение на диоде (вверху) и токи на калориметре в режиме сжатия при $d=5$ см (1) и $d=7$ см (2, 3), (4) — выстрел на коллектор ($d=7$ см), диаметр катода $D=20$ см.

ода до закорачивания и составляет 90%. Максимальное энергосодержание в сжатом пучке было достигнуто при низком давлении остаточного газа в камере сжатия ($\sim 10^{-4}$ Тор), в условиях, когда имеется зарядовая, но практически отсутствует токовая нейтрализация пучка.

Распределение плотности тока по сечению пучка на выходе камеры сжатия было исследовано с помощью рентгеновского электронно-оптического преобразователя и камеры-обскуры. Снимки, сделанные с экспозицией 0,3 мкс, показали, что пучок макроскопически однороден.

Для дальнейшего повышения плотности тока пучка были дополнительно проведены эксперименты по генерации пучка при меньших диодных зазорах. Соответствующая подборка осциллограмм приведена на рис. 2, г. Видно, что во всех случаях диод закорачивался, когда ток пучка не превышал 75 кА, что соответствует плотности тока в пробке 6 кА/см². Не исключено, что ограничение тока связано с развитием неустойчивости пучка. Вероятнее, однако, что более ранний пробой диода обусловлен уменьшением напряжения на диоде, соответствующим увеличением углового разброса и увеличением доли электронов, отражающихся от магнитной пробки [5, 6].

В целом, результаты настоящей работы состоят в следующем:

- 1) получен пучок микросекундной длительности с энергосодержанием 130 кДж при к.п.д. $\sim 60\%$;
- 2) при инжекции пучка в систему магнитной компрессии осуществлено его двадцатикратное сжатие и получен РЭП с энергосодержанием 100 кДж при плотности тока 5 кА/см².

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Д.Д. Рютову за постоянный интерес к работе и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воропаев С.Г., Князев Б.А., Койдан В.С., Конюхов В.В., Лебедев С.В., Меклер К.И., Николаев В.С., Рютов Д.Д., Чикунов В.В., Щеглов М.А. Мощные электронные пучки микросекундной длительности для нагрева плазмы в соленоидах.—В кн.: Доклады 3-й Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов. Ленинград, 1984. М. 1984, т.1, с.298—308.
2. Воропаев С.Г., Койдан В.С., Лебедев С.В., Николаев В.С., Чикунов В.В., Щеглов М.А. Мощный релятивистский электронный пучок для нагрева плазмы.—Докл. АН СССР, т.276, № 1, с.111—115.
3. Воропаев С.Г., Лебедев С.В., Чикунов В.В., Щеглов М.А. Получение микросекундного РЭП на двухмодульном LC-генераторе.—Письма в ЖТФ, 1985, т.11, вып.5, с.267—270.
4. Ghikunov V.V., Knyazev B.A., Koidan V.S., Konyukhov V.V., Lebedev S.V., Mekler K.I., Shcheglov M.A., Voropaev S.G. Magnetic Focusing of an Intense Microsecond Relativistic Electron Beam.—Laser and Particle Beams, 1985, v.3, pt 3, p.259—262.
5. Ghikunov V.V., Knyazev B.A., Koidan V.S., Lebedev S.V., Shcheglov M.A., Voropaev S.G. Magnetic Focusing of 80 kJ Microsecond Electron Beam for Plasma Heating in Solenoids.—12th European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics. Budapest, 1985, Europhys. Conf. Abstracts, v.9F, pt 1, p.508—511.
6. Воропаев С.Г., Князев Б.А., Койдан В.С., Конюхов В.В., Лебедев С.В., Меклер К.И., Чикунов В.В., Щеглов М.А. Исследование транспортировки РЭП через магнитную пробку. —Препринт ИЯФ СО АН СССР 86-82. Новосибирск, 1986, 5с.

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

Получение мощного микросекундного РЭП с высокой плотностью тока

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 11 ноября 1986 г.
Подписано в печать 30 XII 1986 г. МН 11911
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0,7 печ.л., 0,6 уч.-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 177

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапинтере Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*