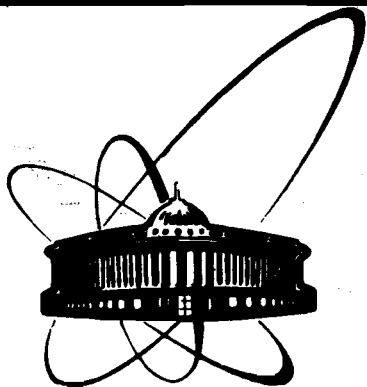


89-388



сообщения  
Объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна

В 436

9-89-388

Ю.Б.Викторов, А.К.Каминский, В.В.Косухин,  
В.П.Саранцев, А.П.Сергеев

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛОТНОГО ЭЛЕКТРОННОГО  
ПУЧКА И ЕГО ТРАНСПОРТИРОВКА  
В ПОЛЕ СОЛЕНоиДА

1989

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время значительно повысился интерес к получению, транспортировке и использованию сильноточных электронных пучков с большой плотностью тока<sup>1,2,3/</sup>. Такие пучки находят применение в физике плазмы, ядерной физике, коллективных методах ускорения частиц, задачах генерации СВЧ-излучения и в технологии. В данной работе приведены результаты экспериментов по формированию и транспортировке плотного ( $I_b \approx 1 \text{ кА/см}^2$ ) электронного пучка в продольном магнитном поле  $B_0$  с малыми колебаниями плотности тока по длине системы. Особенность экспериментальной установки состоит в том, что источником электронов является ускоритель с относительно небольшим импульсным током  $I_b \approx 200 \text{ А}$ .

## 2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Блок-схема установки изображена на рис.1. Источником электронов служил линейный индукционный ускоритель ЛИУ-3000 1 с термоэмиссионным катодом. На выходе ускорителя обеспечивался пучок электронов с параметрами: энергия  $\mathcal{E}_b = 1,5 \text{ МэВ}$  / $\gamma_b = 4$ /, ток  $I_b = 200 \text{ А}$ , длительность импульса тока  $\tau_b = 200 \text{ нс}$ , энергетический разброс в пучке  $\frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}} \approx 1 \div 2 \cdot 10^{-2}$ . Ускоритель работал с частотой повторения 1 Гц.

Фокусировка пучка после ускорителя осуществлялась системой тонких одиночных линз 2, расположенных на электронопроводе -

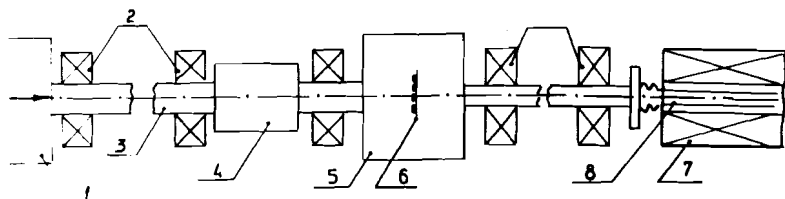


Рис.1. Схема установки: 1 - ускоритель, 2 - линзы, 3 - электронопровод, 4 - корректирующая система, 5 - измерительная коробка, 6 - ламельный датчик, 7 - соленоид, 8 - волновод.



толстостенной металлической трубе 3. С помощью линз 2 на оси электропровода создавалось постоянное во времени, регулируемое в пределах  $0 \div 1$  кГс магнитное поле, что обеспечивало транспортировку пучка с размерами  $1 \div 1,5$  см. После прохождения через измерительную коробку /ИК/ 5 и согласующий участок электронный пучок инжектировался внутрь волновода 8, в объеме которого с помощью соленоида 7 создавалось импульсное продольное магнитное поле  $B_0$ . Длительность  $\tau_u$  импульса поля соленоида значительно превышала длительность импульса тока пучка  $\tau_p \approx 2$  нс/. Волновод 8 представлял собой тонкостенную  $\delta = 0,5$  мм/ трубу из нержавеющей стали с внутренним диаметром 19 мм и длиной  $L = 1$  м. Линзы согласующего участка обеспечивали на оси магнитное поле до 2,5 кГс, что давало возможность в широких пределах регулировать положение кроссовера и размер инжектируемого в волновод пучка.

### 3. СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКА

Амплитуда тока пучка  $I_p$  и смещения  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  его центра относительно оси системы на участке до волновода измерялись индукционными измерителями положения и тока пучка /ИПТ/. Конструктивно ИПТ изготавливались в виде единых блоков. Датчик положения состоял из четырех катушек, намотанных на ферритовом кольце. Катушки включались попарно встречно на два измерительных кабеля. Датчик тока - пояс Роговского также намотан на ферритовом кольце и конструктивно совмещен с датчиком положения. ИПТ размещались внутри электропровода 3, в ИК 5 и на входе в волновод 8. От электрических помех ИПТ были защищены латунными экранами, а от высадки электронов пучка - диафрагмами из нержавеющей стали.

Для измерения распределения плотности тока по сечению пучка использовался ламельный датчик /ЛД/ - линейка из 16 ламелей. Линейка могла вращаться в плоскости  $xu$ , при горизонтальном положении она перекрывала размеры  $d_x = \pm 40$  мм,  $d_y = \pm 2,5$  мм. За начало отсчета координат  $X$  и  $Y$  взята точка на оси системы. ЛД 6 /рис.1/ располагался в ИК 5 и мог дистанционно перемещаться в  $z$  и  $x$ -направлениях.

Для измерений тока и колебаний огибающей пучка в волноводе 8 был изготовлен специальный датчик - цилиндр Фарадея с коллиматором /КЦФ/, схема которого приведена на рис.2. Электронный пучок высаживался на электрод 1, заземленный через шток 2. Электрический ток, протекающий по штоку 2, регистрировался поясом Роговского 3. Со стороны пучка электрод 1 закрывался диафрагмой 4 с отверстиями различного диаметра. Таким образом,

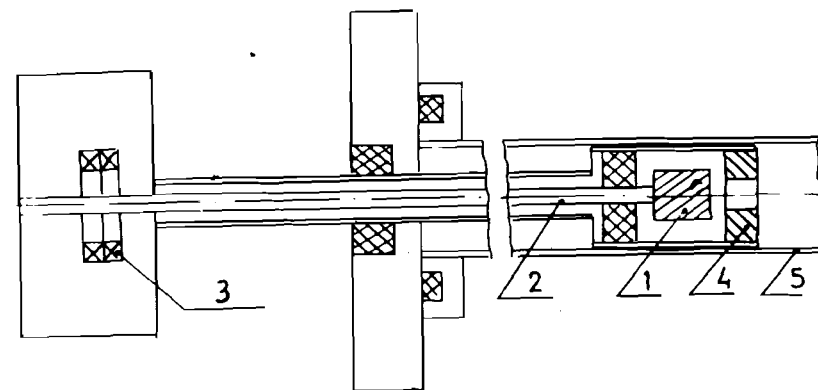


Рис.2. Коллимированный цилиндр Фарадея: 1 - электрод, 2 - шток, 3 - пояс Роговского, 4 - диафрагма, 5 - волновод.

КЦФ измерял часть тока пучка, прошедшую через отверстие диафрагмы 4. В процессе измерений КЦФ дистанционно перемещался внутри волновода 5. Более точные данные о размерах пучка в волноводе 5, положении его центра были получены при совмещении результатов измерений с КЦФ и отпечатков от пучка, полученных по методике прожигания тонких фольг /подробно об этом см. в следующем разделе/.

### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для получения в волноводе пучка большой плотности с малыми колебаниями ее по длине, нужно обеспечить условия согласованной инжекции его в продольное магнитное поле. В связи с этим важно оценить относительные вклады кулоновских сил, конечного фазового объема пучка, определить когерентный угол пучка, учесть влияние краевого поля соленоида и ряд других факторов.

#### 1. Определение когерентного угла и эмиттанса пучка

Измерение проекций  $a_x(a_y)$  когерентного угла  $\alpha$  электронного пучка на плоскости  $yz(xz)$  были выполнены с помощью ЛД /рис.1/. Измерения проводились при таких режимах настройки пучка, при которых поясом Роговского, расположенным на входе в волновод 8, регистрировался ток  $170 \div 200$  А с хорошей повторяемостью амплитуды и формы импульса. Значения  $a_x(a_y)$  вычислялись по формуле:

$$\alpha_{X,Y} \approx \operatorname{tg} \alpha_{X,Y} = \frac{\xi_{X,Y}(Z_2) - \xi_{X,Y}(Z_1)}{Z_2 - Z_1} \quad /1/$$

Здесь  $\xi_{X,Y}(Z_2)$  и  $\xi_{X,Y}(Z_1)$  — соответственно X и Y координаты центра тяжести пучка, измеренные ЛД в точках  $Z_2$  и  $Z_1$ . Получены следующие значения  $\alpha_X$  и  $\alpha_Y$ :  $\alpha_X \approx \alpha_Y = /35 \pm 15/$  мрад. При определении эмиттанса пучка использовалась методика, изложенная в [2,4]. Значения эмиттанса пучка, полученные при нескольких режимах настройки ускорителя, дали следующие результаты:  $F = 9 \div 17$  см·мрад. Большой разброс результатов измерений обусловлен нестабильностями положения центра тяжести пучка, хотя амплитуда тока изменялась незначительно.

На основе полученных результатов с использованием уравнения Владимирского - Капчинского [1]:

$$R'' + \left( \frac{eB_0}{2mC^2 \gamma_b} \right)^2 R - \frac{F^2}{R^3} - \frac{2I_b}{(\beta \gamma_b) I_A R} = 0 \quad /2/$$

можно оценить величину поля  $B_0$ , необходимую для транспортировки пучка с заданными значениями  $I_b$ ,  $\gamma_b$ ,  $R$  и  $F$ . Здесь  $e$ ,  $m$  и  $\gamma_b$  — соответственно заряд, масса и релятивистский фактор электронов;  $R$  — радиус пучка;  $I_A$  — альфвенский ток; штрихами обозначено дифференцирование по  $Z$ . Для стационарного случая  $R'' = 0$ , взяв для оценок  $I_b = 100$  А,  $F = 1,5 \cdot 10^{-2}$  см·рад,  $\gamma_b = 4$ ,  $R = 2,5 \div 1,5$  мм, получим соответственно для  $B_0$  значения  $\sim 5$  кГс. Из уравнения /2/ следует, что в интересующей нас области параметров вклады пространственного заряда и конечно-го фазового объема пучка сравнимы.

## 2. Выбор оптимального режима инъекции

В процессе настройки ускорительного тракта было установлено, что максимальная величина тока, которую удается настроить на КЦФ, расположенный на входе в волновод  $8 / Z = 0 /$  при выключенном поле соленоида  $/B_0 = 0/$ , равнялась  $I_K(0) = 80 \div 90$  А при диаметре диафрагмы  $d = 6$  мм. При этом полный ток пучка на входе в волновод, измеряемый поясом Роговского с апертурой 25 мм, составлял  $170 \div 200$  А. После включения поля соленоида анализировались зависимости тока  $I_K(Z)$ , измеряемого КЦФ, от амплитуды входного тока  $I_K(0)$ , положения кроссовера инжектируемого пучка, амплитуды поля соленоида  $B_0$  и размеров отверстий коллимирующих диафрагм.

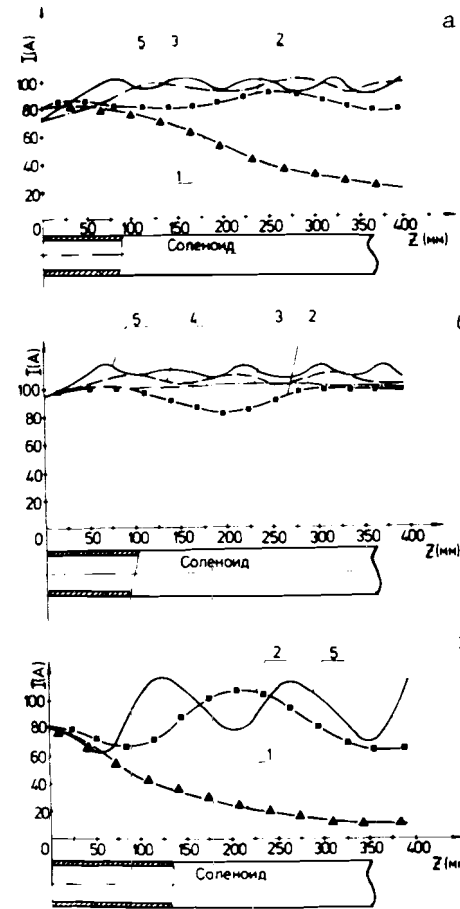


Рис.3. Измерения тока пучка в волноводе при различных значениях поля  $B_0$ , диаметра диафрагмы  $d$  и положениях кроссовера инжектируемого пучка: 1 —  $B_0 = 0$ ; 2 —  $B_0 = 1570$  Гс; 3 —  $B_0 = 3000$  Гс; 4 —  $B_0 = 4500$  Гс; 5 —  $B_0 = 6000$  Гс; а — точка инъекции М, диаметр диафрагмы 6 мм; б — точка инъекции М, диаметр диафрагмы 10 мм; в — точка инъекции N, диаметр диафрагмы 6 мм.

Было установлено, что при изменении  $I_K(0)$  в широких пределах  $50 \leq I_K(0) \leq 90$  А значения величины  $\langle I_K \rangle$  изменяются незначительно  $/80 \leq \langle I_K \rangle \leq 100$  А/, однако с уменьшением  $I_K(0)$  значительно увеличивалась величина колебаний тока по длине системы, например, при  $I_K(0) = 60$  А

$$\frac{\Delta I_K(Z)}{\langle I_K \rangle} = \pm 0,4.$$

/Здесь  $\langle I_K \rangle$  — среднее значение тока  $I_K(Z)$  на длине волновода/. С учетом этого

в дальнейшем будут рассматриваться только такие режимы настройки, при которых  $I_K(0) \geq 80$  А.

Результаты измерений  $I_K(Z)$  в зависимости от положения кроссовера инжектируемого пучка представлены на рис.3. Кривые 1-5 соответствуют измерениям, выполненным с диафрагмой диаметром  $d = 6$  мм при значениях  $B_0$  в интервале  $0 \div 6$  кГс. Кривые на рис.3а соответствуют режиму инъекции пучка, при котором кроссовер его настраивался в точку М, в которой значение поля соленоида равно 0,9 от его максимального значения.

Кривые на рис.3в соответствуют кроссоверу инжектируемого пучка в точку N, соответствующую геометрическому краю соленоида /в этой точке поле составляет 25% от максимального значения/. Рассматривался также режим инъекции при настройке крос-

совера пучка на плато поля солениода в т.0 /причем  $MN = M0 = 40$  мм/. Из сравнения кривых 1-5 рис.3а, в видно, что значения  $\langle I_K \rangle$  для обоих вариантов инжекции пучка примерно равны, но амплитуда колебаний тока пучка на рис.3в значительно больше, чем на рис.3а.

Несколько неожиданными оказались результаты измерений с диафрагмами  $d_1 = 6$  мм и  $d_2 = 10$  мм. Оказалось, что и  $I_K(Z)$  и  $\langle I_K \rangle$  слабо зависят от размеров отверстий диафрагм. Такие результаты можно объяснить, например, тем, что пучок в волноводе имеет смещение относительно оси системы, а размеры диафрагм превышают размеры пучка. Для проверки этого предположения и с целью определения истинных размеров пучка в волноводе были проведены измерения размеров пучка по отверстиям в тонких медных фольгах, устанавливаемых на его пути. Фольги были закреплены на диафрагмах КЦФ и перемещались с ним по волноводу. Для прожигания отверстия, соответствующего размеру пучка, требовалось 3-4 импульса тока пучка, что определялось по восстановлению полных, "невозмущенных" токовых сигналов с электрода КЦФ. На рис.4 показаны фотографии фольг, прожженных в различных экспериментах. На рис.4а,б показаны фольги, извлеченные из волновода после 20 импульсов ускорителя. На фотографиях видно, что в обоих случаях размер отверстий не превышает величины  $d_0 \approx 2R_b \approx 2 \div 3$  мм. На рис.4а также видно, что в этом случае пучок был смещен от оси на 2-3 мм.

В следующем эксперименте внутри волновода помещались пять фольг толщиной 0,5 мм каждая. Расстояние между соседними фольгами равнялось 10 см, за последней фольгой размещался КЦФ. При появлении с КЦФ первого импульса тока /после 125 срабатываний ускорителя/ фольги были извлечены. Оказалось, что первая фольга получила заметные повреждения, в последней, пятой фольге отверстие было слабо различимым, а отверстия во второй /рис.4в/, третьей и четвертой /рис.4г/ фольгах отличались незначительно. Эксперименты с фольгами показали, что радиус

пучка с током 100 А в волноводе составляет  $1 \div 1,5$  мм. Это соответствует плотности тока пучка  $I_b \approx 1 \div 3$  кА/см<sup>2</sup>. Кроме того, из этих экспериментов следует, что размеры и положение пучка имеют хорошую повторяемость от импульса

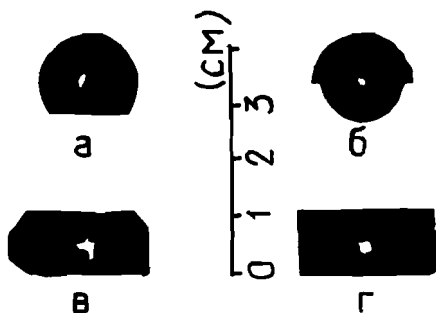


Рис.4. Фотографии фольг с отверстиями от пучка.

к импульсу, но при разных настройках ускорительного тракта центр пучка может смещаться относительно оси системы.

### 3. Система коррекции когерентного угла электронного пучка

Для компенсации смещения пучка относительно оси системы была изготовлена и испытана простая система коррекции когерентного угла пучка /в дальнейшем - система коррекции/. Система коррекции состояла из двух магнитных корректоров К1 и К2 и трех ИПТ Д1, Д2 и Д3 /см. рис.5/. Принцип работы системы коррекции следующий. Регулировкой токов в катушках корректора К1 и линзах, расположенных перед ним /по ходу пучка/, находится такой режим настройки, при котором пучок пересекает ось под корректором К2, что фиксируется датчиком Д1. Регулировкой тока в катушках корректора К2 осуществляется компенсация когерентного угла пучка, что контролируется по отсутствию смещения пучка относительно оси по крайней мере двумя датчиками Д2 и Д3. Результат коррекции когерентного угла пучка иллюстрируется осциллограммами с датчика Д2 на рис.6. Амплитуды двух верхних сигналов пропорциональны смещениям  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  пучка в месте расположения датчика Д2 при выключенной системе коррекции. Средние осциллограммы - сигналы с тех же датчиков при включении системы коррекции. Нижние осциллограммы - сигналы с пояса

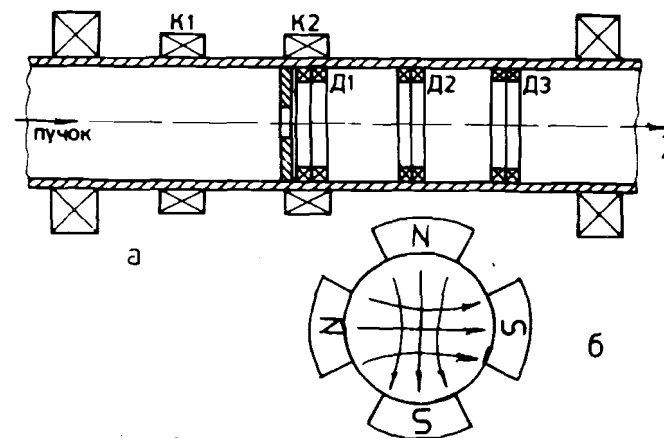


Рис.5. Система коррекции когерентного угла электронного пучка. К1, К2 - корректоры, Д1, Д2, Д3 - измерители тока и положения пучка.

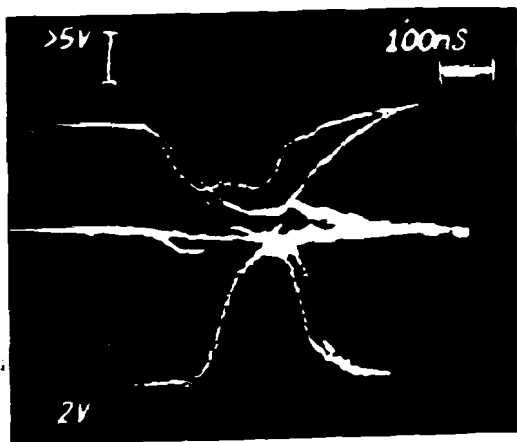


Рис.6. Осциллограммы, иллюстрирующие результат работы системы коррекции; верхняя осциллограмма -  $\Delta X, \Delta Y$  до работы системы коррекции, средняя -  $\Delta X, \Delta Y$  при включенной системе коррекции, нижняя - ток пучка.

Роговского датчика D2 при выключенной системе коррекции. Из рис.6 следует, что система коррекции обе-

спечила уменьшение когерентного угла пучка по крайней мере в пять раз, при этом величина тока в канале не изменялась.

В результате проведенных экспериментов найдены условия, при которых в волноводе длиной 1 м распространяется пучок с плотностью тока  $I \geq 1$  кА/см<sup>2</sup>. Полученные результаты находятся в удовлетворительном согласии с оценками, полученными из уравнения /2/, причем в данном эксперименте влияние конечного фазового объема и сил пространственного заряда пучка сравнимо. Большая величина когерентного угла пучка не оказывает заметного влияния на его размер в волноводе, но приводит к значительному смещению пучка относительно оси симметрии системы. Предложенная в работе простая система коррекции когерентного угла пучка позволяет значительно уменьшить этот угол.

Авторы благодарят сотрудников отдела А.Ф.Кратко, Е.А.Шарапова за помощь в проведении экспериментов на ускорителе, Н.А.Сергееву за помощь в оформлении работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Капчинский И.М. Теория линейных резонансных ускорителей. М.: Энергоиздат, 1982.
2. Бондарев Б.И., Дуркин А.П. - ЖТФ, 1986, т.56, № 11, с.2132.
3. Маршалл Т. Лазеры на свободных электронах. М.: Мир, 1987.
4. Аносов В.Н., Богач А.В., Данилов В.И., Розанов Е.И. ОИЯИ, 9-12361, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел  
31 мая 1989 года.

Викторов Ю.Б. и др.

9-89-388

Формирование плотного электронного пучка и его транспортировка в поле соленоида.

Приведены результаты экспериментов по формированию и транспортировке в продольном магнитном поле плотного ( $I_b = 1$  кА/см<sup>2</sup>) электронного пучка с малыми колебаниями плотности тока по длине системы. Особенность эксперимента состоит в том, что источником электронов является ускоритель ЛИУ-3000 с относительно небольшим по величине импульсом тока  $I_b = 200$  А. Рассмотрены система диагностики и система коррекции когерентного угла электронного пучка.

Работа выполнена в Общественном научно-методическом отделе ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Перевод авторов

Viktorov Yu.B. et al.

9-89-388

Forming and Transport of the Dense Electron Beam in a Solenoid Field

The results of the experiment on the transport and forming of the dense electron beam with small oscillations of the current density in the longitudinal magnetic field ( $I_b = 1$  кА/см<sup>2</sup>) on the system length are given. The peculiarity of the experiment consists of the fact, that the electron source is the LIU-3000 accelerator with a relatively small current pulse  $I_b = 200$  А. The diagnostic system and the system of the electron beam coherent angle correction are examined.

The investigation has been performed at the Scientific-Methodical Division, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1989