

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО УСКОРЕНИЮ ЭЛЕКТРОНОВ
В БЕТАТРОНЕ С ПОСТОЯННЫМ УПРАВЛЯЮЩИМ ПОЛЕМ****В. Н. Канунников, П. С. Михалев**

УДК 621.384.612

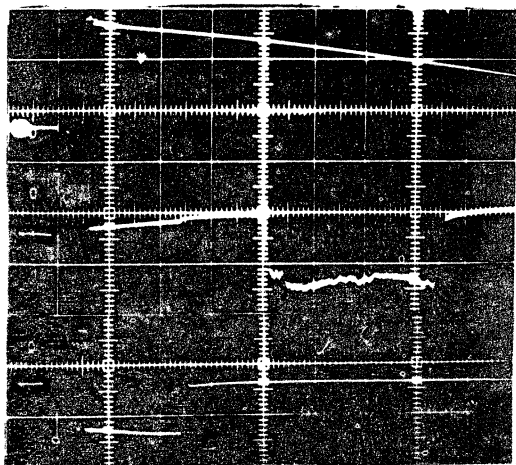
Эксперименты, поставленные на электронном кольцевом фазотроне ФИАН, показали, что в бетатроне с постоянным управляющим полем можно получать ускоренные пучки с интенсивностью выше 10^{14} электронов/сек.

1. Введение. В кольцевом фазотроне управляющее поле постоянно во времени, и возможен режим квазинепрерывного индукционного ускорения (так называемый "бетатрон с постоянным полем" (БПП), см. напр. /1/). В первых экспериментах на электронном кольцевом фазотроне (ЭКФ) ФИАН /2/ показано, что при инъекции в течение 1-5 мксек интенсивность ускоренного пучка увеличивается пропорционально времени инъекции. Ниже описаны эксперименты, выполненные после усовершенствований, позволивших увеличивать длительность инъекции до 25 мксек (~ 500 оборотов частиц) и проводить абсолютные измерения интенсивности пучка.

2. Аппаратура и методика. Описание ЭКФ ФИАН опубликовано /3/, поэтому приведем лишь краткую характеристику аппаратуры инъекции и индукционного ускорения (подробнее см. /4/). Инжектором служит электрическая пушка на 60-70 кВ с электростатическим инфлектором. Высоковольтные импульсные генераторы вытягивающего и инфлекторного напряжений позволяют регулировать длительность инъекции τ в довольно широких пределах. Бетатронное ускоряющее напряжение имеет форму двух следующих друг за другом треугольных импульсов с крутыми передними фронтами; у первого импульса длительность 20 мксек, амплитуда ~ 940 в, у второго - 200 мксек и 470 в. Второй импульс представлен на верхней осциллограмме рис. 1.

Вылетающие из инфлектора электроны ускоряются и достигают мишени, установленной на некотором фиксированном радиусе,

соответствующем энергии 0,5–1,5 Мэв. Величина этой энергии зависит от изменения ускоряющего потока и может быть точно определена по известным значениям радиуса орбиты и индукции управляющего поля. Аппаратура индикации позволяла наблюдать форму и измерять



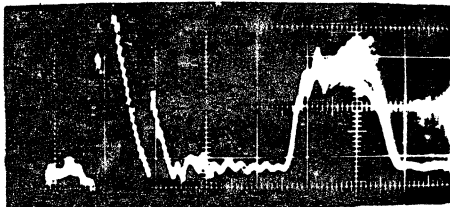
Р и с.1. Верхняя осциллограмма – ускоряющее напряжение, (масштаб по вертикали 250 в/см); средняя – ускоренный до $\sim 1,0$ Мэв пучок (сигнал со спитилизационного детектора); нижняя осциллограмма – импульс тока инжекции (масштаб по вертикали 5 ма/см). Скорость развертки 10 мксек/см

среднее значение тока как инжектируемого, так и ускоренного пучка. Ток инжекции измеряется с помощью цилиндра Фарадея, вводимого в конце первого оборота пучка и обеспечивающего полное поглощение и абсолютные измерения тока. К цилиндру Фарадея можно подключать как магнитоэлектрический микроамперметр, так и сопротивление нагрузки, согласованное с кабелем, идущим на вход осциллографа. Аналогичным способом регистрируется пучок, ускоренный до мишени: средний ток измеряется наноамперметром (типа Ф И16/2); сигнал с сопротивления предварительно усиливается импульсным широкополосным усилителем типа УИ-2.

Импульс тока инжекции представлен на нижней осциллограмме рис.1, а тока ускоренного пучка – на средней осциллограмме рис.1

(сигнал со спинтэляционного детектора) и на рис. 2 (ток на мишень).

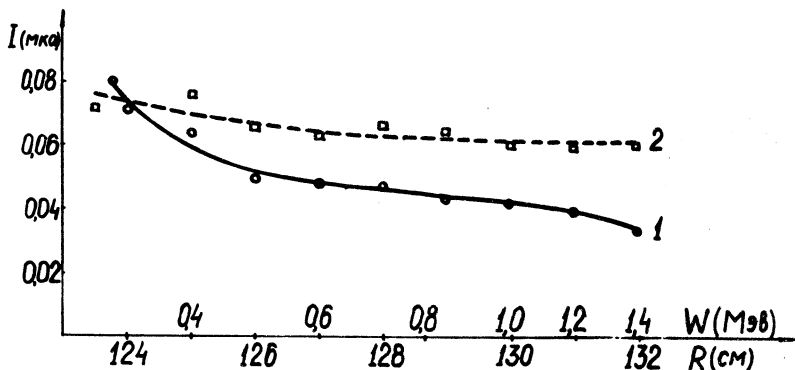
Вторичная эмиссия из мишени может занимать измеримый электронный ток. Погрешности при измерениях тока пучка, падающего на металлическую пластину в магнитном поле ускорителя, подробно рассмотрены в работе /5/. Анализ экспериментальных данных, расчеты



Р и с.2. Импульсы тока на мишень (справа; слева - наводка от ускоряющей системы); ускорение электронов до $\sim 0,5$ Мэв при $\tau = 10$ мксек, $I_1 = 1,2$ ма. Масштаб по вертикали - $0,1$ ма/см., по горизонтали - 10 мксек/см

и оценки показывают /5/, что (по крайней мере, при кинетической энергии электронов $\leq 1,6-1,75$ Мэв) вторичная эмиссия не вносит погрешности, большей 1%. Условия нашего эксперимента несколько отличались от условий работы /5/, поэтому были проведены контрольные опыты. Сравнение измерений тока цилиндром Фарадея и мишенью на первом обороте пучка показало согласие данных в пределах погрешности измерений. Измеренный ток инжектируемых и ускоренных частиц не зависит от формы и материала мишени (молибденовый стержень диаметром 3 мм и медная посеребренная пластинка толщиной 1 мм), а также от потенциала мишени, регулируемого в пределах ± 300 в. Далее, были проведены измерения зависимости ускоренного тока от радиуса мишени; при этом сначала были отмечены потери частиц (кривая 1, рис. 3). После коррекции управляющего поля потери устранены и перемещение мишени по радиусу в пределах от 123 см до 132 см (изменение кинетической энергии электронов от 0,2 до 1,4 Мэв) не приводит к существенному изменению регистрируемого тока (кривая 2 на рис.3). Такое постоянство тока при изменении энергии служит косвенным подтверждением того, что в условиях опыта вторичная эмиссия не играет заметной роли.

3. Результаты. Некоторые результаты измерений среднего тока I ускоренных электронов от длительности инъекции τ (при частоте повторения циклов 50 гц) приведены на рис. 4. Использовались две методики изменения τ . В первом случае для получения каждой



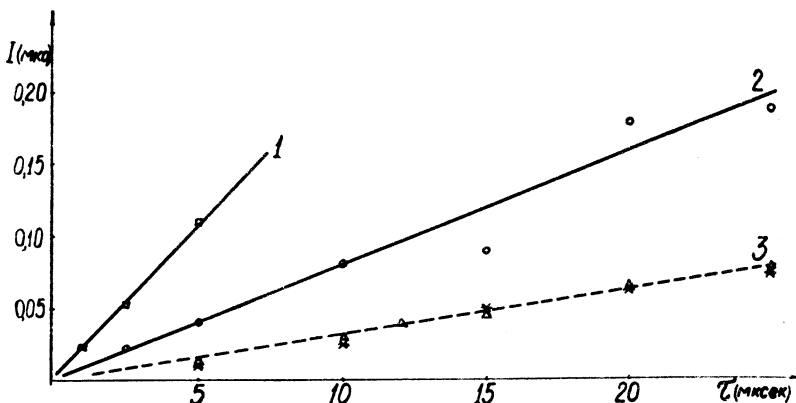
Р и с. 3. Зависимость среднего тока ускоренных электронов от радиуса мишени. 1 - до коррекции управляющего поля; 2 - после коррекции. Для кривой 1 амплитуда тока инъекции $I_1 = 5,3$ ма, для кривой 2 $I_1 = 1,3$ ма, $\tau = 2,5$ мксек; $U = 940$ в

экспериментальной точки проводилась регулировка аппаратуры инъекции (удлинение импульсов, управляющих высоковольтными генераторами, совмещение этих импульсов во времени, измерение амплитуды и длительности тока инъекции и др.). При второй, менее трудоемкой методике, длительность импульса тока из инжектора сохранялась неизменной и равной 25 мксек, а время τ регулировалось изменением задержки импульса ускоряющего напряжения относительно начала импульса тока. Кривые 1 и 2 на рис. 4 получены первым методом; кривая 3 - и тем и другим (точки, обозначенные треугольниками, получены первым методом, звездочками - вторым).

Как видно из рис. 4, ток ускоренных электронов в исследованном диапазоне значений I и τ пропорционален длительности инъекции и зависит от ускоряющего напряжения (кривые 1 и 2 соответствуют $U \approx 940$ в, кривая 3 - напряжению 470 в). Зависимостей, которые указывали бы на влияние сил пространственного заряда, в обследованной области параметров не обнаружено. Это согласуется

со сравнительно малой величиной ускоряемого заряда ($\sim 3 \cdot 10^{10}$ электронов/импульс).

Кривая 1, идущая выше кривой 2 (рис.4) получена, соответственно, при большей амплитуде тока инжекции. Однако отмечены слу-

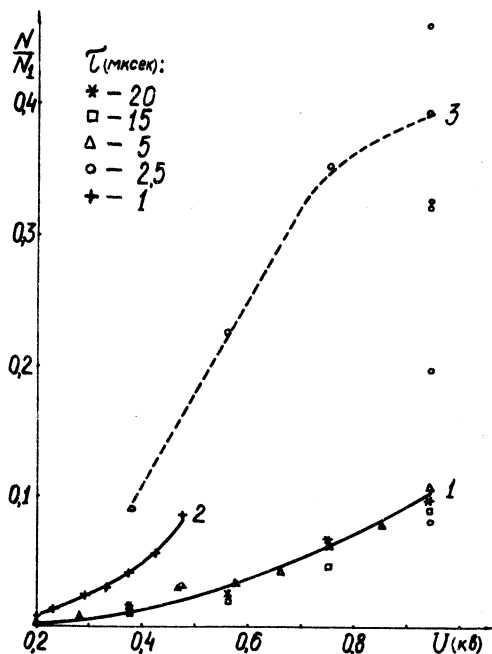


Р и с.4. Зависимость среднего тока ускоренных электронов от длительности инжекции. Для кривой 1 энергия электронов $W = 0,5$ Мэв, амплитуда тока инжекции $I_1 = 5,5$ ма, ускоряющее напряжение $U = 940$ в. Для кривой 2 то же, что и для 1, но $I_1 = 1,3$ ма. Для кривой 3 $W = 1,0$ Мэв, $I_1 = 7,4$ ма, $U = 470$ в

чай, когда те же ускоренные токи получены при существенно меньших токах инжекции (см.рис.3). Это объясняется различной эффективностью захвата в режим ускорения; она определяется, как известно, рядом соотношений в фазовом пространстве (эмиттанс инжектируемого пучка, геометрия оптической системы инжектора, точность юстировки относительно орбиты и др.), которые в процессе экспериментов не контролировались.

Получение высокой эффективности инжекции является одной из главных задач при разработке БШ, так как от нее зависит экономичность необходимой для БШ мощной системы инжекции. Поэтому несмотря на неконтролируемость и недостаточную воспроизводимость указанных условий, была сделана попытка измерить эффективность инжекции и определить ее зависимость от амплитуды ускоряющего напряжения.

Результаты измерений эффективности инъекции, определяющейся как отношение числа N частиц, ускоренных до энергии $\sim 0,4$ Мэв (радиус 125 см), к числу N_1 инжектированных частиц, с энергией 0,06 Мэв, совершивших один оборот (радиус 118 см), приведены



Р и с. 5. Зависимости эффективности инъекции от амплитуды ускоряющего напряжения (см. текст). Нанесены также отдельные результаты (кружки), полученные в других сериях измерений при постоянном ускоряющем напряжении

на рис. 5. В одной из серий измерений при $U = 940$ в эффективность составляет около 10% и при уменьшении U до ~ 200 в падает до 1% (кривая I на рис. 5). От длительности инъекции, при неизменных прочих условиях, эффективность не зависит (точки кривой I, рис. 5, получены при различных значениях τ), что подтверждает отсутствие эффектов пространственного заряда. Приме-

ром случаев, когда получена более высокая эффективность инжекции, являются приведенные на рис. 5 кривые 2 и 3.

Сравнение величины эффективности и характера ее зависимости от амплитуды ускоряющего напряжения с расчетами по одноэлектронной теории (см./6/) показало, что пороговое значение U примерно соответствует расчетам, а измеренные значения эффективности в 2-7 раз ниже расчетных (соответственно, для кривых 3 и 1, рис. 5).

Условия экспериментов не всегда позволяли обеспечить воспроизводимость эффективности инжекции, что, по-видимому, обусловлено главным образом рядом несовершенств инжектора, не рассчитанного на рассеяние большой мощности. Тем не менее, полученные результаты позволяют сделать ряд выводов.

Выводы. I. Экспериментально подтверждена реализуемость принципа БПШ в пределах исследованной области параметров. По-видимому, этот вывод можно перенести и на другие области, эквивалентные исследованной по отсутствию влияния пространственного заряда и по скорости отвода частиц от инжектора (та же плотность заряда, тот же шаг орбиты за оборот и др.).

2. Получены данные для оценки эффективности инжекции в БПШ и необходимой амплитуды ускоряющего напряжения; подтверждена применимость для грубых оценок одноэлектронной теории захвата.

Поскольку амплитуда $U_{\text{н}}$ синусоидального ускоряющего напряжения в бетатроне определяется амплитудой $\Phi_{\text{н}}$ и частотой повтращения f ускоряющего магнитного потока, получение напряжений $U_{\text{н}} \sim 10^3$ в при работе на промышленной частоте $f = 50$ гц возможно лишь при $\Phi_{\text{н}} \geq 3$ вб, что соответствует БПШ на максимальную энергию $w \geq 100$ Мэв. При низких энергиях возможен переход к повышенной частоте f : в БПШ ускоряющий поток отделен от управляющего поля и его можно сосредоточить в замкнутом магнитопроводе из материала с малыми потерями на высоких частотах.

3. Полученные результаты позволяют оценить нижний предел интенсивности пучка в указанном варианте БПШ, работающего на повышенной частоте, Исходя из полученной на опыте величины $\tau_{\text{н}} = 25$ мксек и, например, коэффициента заполнения пучка $\eta = 0,1$ (что соответствует $f = \eta/\tau_{\text{н}} = 4 \cdot 10^3$ гц), получим среднюю интенсивность пучка в 80 раз больше достигнутой при частоте 50 гц, т.е. $\sim 0,2 \times$

$\times 80 = 16$ мка или 10^{14} электронов/сек. Конкретный выбор частоты повторения f будет зависеть, конечно, от выбора других параметров ускорителя и от типа ферромагнетика, используемого в ускоряющей системе.

Авторы приносят искреннюю благодарность А. А. Коломенскому за поддержку в работе, В. А. Пападичеву за плодотворные дискуссии, Л. Н. Казанскому, разработавшему высоковольтную аппаратуру для длительной инжекции, Л. Н. Чекановой за большую помощь в оформлении работы.

Поступила в редакцию
12 декабря 1973 г.

Л и т е р а т у р а

1. Л. Н. Казанский, В. Н. Канунников, А. А. Коломенский, В. А. Пападичев, А. П. Фатеев, Б. Н. Яблоков. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям (Москва, 1968 г.) т. II, стр. 351, ВИНТИ (1970).
2. L. N. Kazansky, V. N. Kanunnikov, A. A. Kolomensky et al. Proc. VI Intern. Conf. on High-Energy Accel. (Cambridge, 1967). p 419 (1967).
3. В. Н. Канунников, А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев, Е. П. Овчинников, А. П. Фатеев, Б. Н. Яблоков. ПТЭ № 5, 71 (1967).
4. Л. Н. Казанский. Диссертация, ФИАН, 1971 г.
5. Е. М. Мороз, Н. С. Соловьев. Препринт ФИАН, 1966 г.
6. А. Н. Лебедев. ЖТФ, 29, 1339 (1959).