

В.Л.Ауслендер, Т.А.Всеволожская,
Л.Л.Данилов, С.И.Мишнев, А.А.Наумов,
Г.И.Сильвестров, А.Н.Скринский

Инжекция и накопление позитронов

Препринт

В.Л. Ауслендер, Т.А. Всеволожская, Л.Л. Данилов,
С.И. Мишнев, А.А. Наумов, Г.И. Сильвестров,
А.Н. Скринский

ИНЖЕКЦИЯ И НАКОПЛЕНИЕ ПОЗИТРОНОВ

г. Новосибирск
1966 г.

А Н Н О Т А Ц И Я

Описывается получение и инжекция позитронов в накопитель ИЯФ СО АН СССР. Позитронный пучок получается конверсией электронов во внешней мишени и формируется с помощью специальных короткофокусных линз. Впуск частиц в накопитель осуществляется по вертикали, захват однооборотный. Проводится анализ условий, обеспечивающих максимальный коэффициент захвата, равный $1 \cdot 10^{-4}$ при апертуре магнита вертикальной $\Delta Z = \pm 37$ мм и горизонтальной $\Delta R = \pm 30$ мм. Описывается методика и результаты настройки системы получения и инжекции позитронов и изучения оптимальных условий захвата и накопления.

Полученный коэффициент захвата позитронов $\sim 1 \cdot 10^{-4}$ при апертуре $\Delta Z = \pm 37$ мм и $\Delta R = \pm 30$ мм. Скорость накопления $\sim 0,7$ ма/мин, максимальный накопленный ток - 20 ма.

На установке ВЭПШ-2 осуществлен метод внешней инжекции позитронов, при котором электронный пучок, выпущенный из ускорителя-инжектора формируется электронно-оптическими системами и конвертируется в позитроны на толстой мишени вне накопителя. Далее, сформированный позитронный пучок высокой энергии впускается по вертикали в накопитель. Этот вариант инжекции основан на оптимальном преобразовании фазового объема электронного пучка в позитронный с помощью специальных короткофокусных магнитных линз и оптимальном впуске последнего в накопитель.

И Н Ж Е К Ц И Я

Накопитель ВЭПШ-2 находится на расстоянии 11,6 м от ускорителя-инжектора и их медианные плоскости разнесены по вертикали на 0,68 м.

На расстоянии 3,3 м от накопителя расположен так называемый блок конвертера, состоящий из двух специальных короткофокусных магнитных линз (называемых параболическими или X-линзами [1]), в фокальной плоскости которых расположен конвертер. X-линза представляет собой два параболоида вращения из бериллия с переменной толщиной стенок, соединенных вершинами (шейкой). Ток, направленный вдоль оси параболоидов, создает в пространстве между ними магнитное поле, обеспечивающее аксиально-симметричную фокусировку пучка, падающего параллельно оси и, проходящего сквозь тонкие стенки линзы.

Первая X-линза фокусирует электронный пучок на конвертер в пятно малого размера, а вторая X-линза собирает образовавшиеся позитроны в большом телесном угле, образуя параллельный пучок частиц.

Параметры работающих на комплексе X-линз следующие: толщина стенок 0,12 мм у места токоподвода и 0,20 мм у шейки, апертура 20 мм, диаметр шейки 5 мм, ток 120 ка, фокусное расстояние для линзы, фокусирующей электроны с энергией 250 Мэв, $F_{X-1} = 17,5$ см, и для линзы, собирающей позитроны с энергией 110 Мэв, $F_{X-2} = 7$ см.

Пара впускных магнитов, осуществляющая параллельный перенос пучка на высоту 0,62 м, вводит позитронный пучок в магнитное поле накопителя в начале квадранта на равновесном радиусе ниже медианной плоскости. При этом, верхний магнит своей внешней стенкой ("нож") ограничивает вертикальную апертуру накопителя снизу $\Delta z = 37$ мм.

Инфлектор, расположенный во втором от впуска квадранте, уменьшает амплитуду вертикальных бетатронных колебаний впускаемого пучка.

При этом, ранее накопленный пучок находится в полном поле инфлектора и амплитуда раскачки его бетатронных колебаний при инъекции очередного импульса частиц ограничивает возможную величину удара. Аксиальный акцептанс накопителя, который при рабочем значении амплитуды раскачки накопленного пучка равной $0,67$ аксиальной апертуры A_z , составляет 35 мрад $0M$, при угле наклона выпускаемого пучка как целого относительно медианной плоскости (равном $2 \cdot 10^{-3}$ рад).

Радиальная апертура камеры накопителя $A_r = \pm 30$ мм позволяет эффективно захватывать частицы с энергиями в интервале $\frac{\Delta E}{E} = \pm 0,4\%$ внутри фазового объема 20 мрад $\times 4$ см.

К О Н В Е Р С И Я

Преобразование электронов в позитроны на мишени можно характеризовать коэффициентом конверсии в полный телесный угол при заданном энергетическом интервале и угловым распределением позитронов.

При высоких энергиях коэффициент конверсии зависит только от отношения позитронной и электронной энергий и от толщины конвертера.

Для обеспечения максимальной скорости накопления энергия позитронов выбиралась такой, чтобы соблюдалось оптимальное соотношение между коэффициентом конверсии и временем радиационного затухания пучка в накопителе. Оптимальная толщина конвертера выбиралась по максимальной конверсии в угол, определяемый сборанием оптической системы.

В нашем случае толщина материала конвертера выбрана равной одной радиационной единице длины $/3$ мм $W /$, близкая к оптимальной для углов собирания $0,08 \pm 0,13$ радиана. Угловое распределение позитронов с энергией $E_p \approx 0,5 \Gamma_e \approx 100$ МэВ при такой толщине конвертера близко к распределению Гаусса со среднеквадратичным углом $\sqrt{\theta^2} = 0,09$ радиана. Очевидно, что пучок с такой угловой расходимостью не может быть эффективно захвачен в накопитель без специального формирования его.

Оптимальное формирование позитронного пучка включает в себя, во-первых, получение минимального прироста фазового объема электронного пучка при конверсии в позитронный и, во-вторых, преобразование фазового объема позитронов к форме, наиболее соответствующей акцеп-

тансу накопителя.

Фокусировка электронов на блок конвертера (1,2,3) рис. 1 осуществляется квадрупольным дублетом так, чтобы размер пучка на первой X-линзе позволял смещать его с шейки во избежание потерь электронов.

Схема, передающая позитронный пучок со второй X-линзы на вход накопителя (рис. 1), состоит из квадрупольного дублета (5) и пары поворотных впускных магнитов (6,7). Магниты имеют показатель спада поля $\eta = 1$ и не оказывают фокусирующего действия на пучок в своей радиальной плоскости (вертикальной плоскости накопителя). Фокусировка здесь осуществляется только квадрупольным дублетом, который передает изображение позитронного пучка со второй X-линзы на вход в накопитель с увеличением равным $U_2 \approx 1$.

В горизонтальной плоскости накопителя совместная фокусировка дублета и магнитов позволяет иметь на входе в накопитель изображение пучка со второй X-линзы также с увеличением $U_r \approx 1$, так, что астigmatизм квадрупольного дублета оказывается скомпенсированным. Для лучшего соответствия фазового объема пучка акцептансу накопителя горизонтальный коэффициент увеличения выбран равным 1,3.

На рис. 2а,б приведены фазовые объемы позитронного пучка на входе в накопитель в горизонтальной /а/ и вертикальной /б/ плоскостях, пропущенные оптической системой для равновесной энергии E и энергии отличной от нее на $\pm 0,8\%$. Линии, ограничивающие фазовый объем, есть проекции апертур X-линзы П /1/, квадрупольного дублета aa' .. верхнего впускного магнита /2/.

НАСТРОЙКА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И БЛОКА КОНВЕРТЕРА

Настройка оптической системы позитронного канала проводилась узким электронным пучком, который получался с помощью свинцовой диафрагмы с отверстием диаметром 1 мм, помещенной в месте конвертера. Пучок из ускорителя направлялся на диафрагму без фокусировки и размер его составлял $\sim 20 \times 30$ мм², что позволяло иметь практически постоянную интенсивность вырезаемого пучка при движении диафрагмы на ± 1 см в любом направлении. Изображение пучка фотографировалось на входе в накопитель. Критерием правильной настройки оптической схемы служила независимость координаты изображения зондирующего пучка от угла отклонения его катушкой (4), расположенной непосредственно за диафрагмой,

так как на входе в накопитель должен был находиться фокус оптической системы. Увеличение системы измерялось путем сопоставления смещений зондирующего пучка (смещения диафрагмы) и его изображения на входе в накопитель (смещение на фотопленке). При этом не было обнаружено существенных искажений формы пучка за счет аберраций.

Этот же метод применялся для изучения акцептанса накопителя путем измерения эффективности захвата в зависимости от смещения зондирующего пучка и угла, даваемого ему катушкой. При этом радиальная область захвата соответствует апертуре $A_r \approx 3$ см, что хорошо согласуется с измерениями, проведенными путем смещения накопленного пучка по камере накопителя.

Для эффективного использования радиальной апертуры (захвата широкого энергетического интервала позитронов) оказалось необходимым скорректировать квадратичную нелинейность основного поля магнита $\frac{dy}{dr} = 0,045$ 1/м, выбрать значения частот бетатронных колебаний вдали от опасных нелинейных резонансов [1]. В рабочем режиме квадратичная нелинейность не превышает $\frac{dy}{dr} \approx 10^{-4}$ 1/см и значения частот бетатронных колебаний $\nu_r = 0,7$, $\nu_z = 0,8328$. Для уменьшения потерь частиц при инжекции из-за радиально-фазовых колебаний момент впуска частиц синхронизировался с фазой высокочастотного напряжения на резонаторе. Соответствующая зависимость приведена на рис. 3.

Вертикальная область захвата оказалась в хорошем согласии с расчетной при апертуре $A_z \approx 37$ мм и расщепке $\beta = 0,67 A_z$. Эффективная толщина "ножа", в нашем случае составляет ~ 5 мм. Измерялась она по минимальному удару инфлектора, с которого начинается захват позитронов в накопитель. Внешние поля магнита, в нашем случае составляют в среднем $\sim 0,2\%$ от поля накопителя на длине 10 см и практически не влияют на процесс накопления.

Настройка олока конвертера проводилась с помощью ленточного вольфрамового конвертера шириной 1 мм и толщиной 3 мм способного перемещаться во всех трех измерениях.

В условиях, когда вторая X-линза выключена количество позитронов, захваченных в накопитель, пропорционально количеству электронов, попадающих на ленточный конвертер. Таким образом, измеряя захват в накопитель в зависимости от перемещения конвертера поперек пучка в месте предполагаемого фокуса, мы снимаем кривую поперечного распре-

ления плотности электронного пучка. Затем конвертер ставится в точку, соответствующую максимуму кривой и снимается распределение плотности вдоль оси электронного пучка. Фокусу пучка соответствует точка на его оси с максимальной плотностью. Таким образом, положение фокуса оказывается полностью определенным, так же как и размер пучка в фокусе, который для $F_{X1} = 17,5$ см составляет $\sqrt{\bar{r}^2} = \pm 0,5$ мм.

При включенной второй X-линзе ее фокус определялся как точка, соответствующая максимальной эффективности собирания позитронов. Кривые зависимости захвата позитронов в накопитель от перемещений конвертера корректировались на распределение плотности электронного пучка по поправочным кривым, снятым при выключенных X-линзах, и в окончательном виде служили для определения положения фокуса второй линзы и его ширины.

Настройка пары линз состояла в совмещении их фокусов друг с другом, что достигалось дистанционным перемещением линз по всем трем координатам.

Оптимальность толщины конвертера проверялась по эффективности захвата позитронов при перемещении поперек пучка клинообразного конвертера (рис. 4). Кривые рис. 5 характеризуют захват позитронов с различных точек конвертера, помещенного в месте общего фокуса пары X-линз.

В окончательном режиме эффективные (среднеквадратичные) параметры позитронного пучка на входе в накопитель составляют $\bar{r} = \pm 9$ мм, $\bar{\alpha}_r = \pm 8 \cdot 10^{-3}$ рад, $\bar{z} = \pm 7$ мм, $\bar{\alpha}_z = \pm 1 \cdot 10^{-2}$ рад.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Окончательная подстройка элементов позитронной схемы проводилась по максимальному захвату в накопитель. Критерием правильности настройки служило совпадение с расчетными зависимостями захвата от параметров элементов оптической схемы, а также от поля накопителя, амплитуды напряжения на резонаторе и синхронизации его фазы с моментом инжекции и, что наиболее существенно, хорошее согласие экспериментального и расчетного (для реальных условий) коэффициентов захвата позитронов в накопитель.

Под полным коэффициентом захвата позитронов мы понимаем отношение количества позитронов, захваченных в накопитель, к количеству

электронов, выпущенных из инжектора, который может быть выражен следующим соотношением:

$$K = K_0 \cdot K_B \cdot K_S, \text{ где}$$

K_0 — коэффициент конверсий в захватываемый второй X-линзой телесный угол равный $0,1$ стерadians при энергиях $E_0 = 250$ Мэв и $E_2 = 110$ Мэв и составляет $K_0 = 7,7,5 \cdot 10^{-2} \frac{\Delta E}{E}$, при напряжении на резонаторе 5 кв $\frac{\Delta E}{E} = \pm 0,4 \cdot 10^{-2}$.

K_B — эффективный коэффициент захвата позитронов в бетатронный режим, равный $K_B = 0,2$.

K_S — коэффициент захвата позитронов в синхротронный режим при синхронизации момента инжекции с фазой в.ч. резонатора, равный $K_S = 0,87$.

Таким образом, полный коэффициент конверсии в нашем случае составляет $K = 7,5 \cdot 10^{-2} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 \cdot 0,87 \approx 1 \cdot 10^{-4}$.

При выпущенном из ускорителя-инжектора электронном токе ~ 300 ма получена скорость накопления ~ 700 мка/мин. Предельный накопленный ток позитронов ~ 20 ма ограничивался возбуждением радиальной поперечной неустойчивости [3].

Л и т е р а т у р а

- /1/ Г.И. Будкер и др. "Труды международной конференции по ускорителям", Дубна, 1963 г.
- /2/ В.Л. Ауслендер и др. "Проявление нелинейных резонансов в накопителях". Доклад, представленный на Международную конференцию в Орсе (Франция).
- /3/ В.Л. Ауслендер и др. "Изучение самовозбуждения и ускоренного затухания когерентных поперечных колебаний в накопителе. см. 2

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1 Электронно-оптическая схема позитронного тракта ВЭПП-2

1. X-линза I, 2. Конвертер, 3. X-линза II, 4. Вакуумпровод, 5. Квадрупольный дублет, 6. Нижний впускной магнит, 7. Верхний впускной магнит, 8. Медианная плоскость накопителя, 9. Рабочая камера накопителя, 10. Равновесная траектория впуска.

Рис. 2-а и 2-б Фазовый объем позитронного пучка в месте впуска, аксиальный и радиальный акцептанс накопителя.

1. Апертура X-линзы II, 2. Апертура верхнего впускного магнита, 3. "Нож" впускной системы, 4. Аксиальная фазовая область накопителя, 5. Медианная плоскость накопителя, 6. Рабочая точка, 7. Аксиальный акцептанс накопителя, 8. Радиальная фазовая область накопителя, 9. Радиальный акцептанс накопителя, — граница апертуры квадрупольного дублета, aa_1 — граница апертуры верхнего впускного магнита, bb_1 — граница апертуры нижнего впускного магнита.

Рис. 3 Зависимость эффективности захвата позитронов при синхронизации фазы в.ч. напряжения на резонаторе с моментом впуска частиц.

Рис. 4 Зависимости эффективности захвата позитронов от толщины конвертера.

Рис. 5 Зависимость эффективности захвата позитронов с различных точек конвертера.

1. Захват позитронов при выключенной Хл-I и Хл-II.
2. Захват позитронов при включенной Хл-II.
3. Кривая эффективно захвата позитронов исправленная по I кривой.

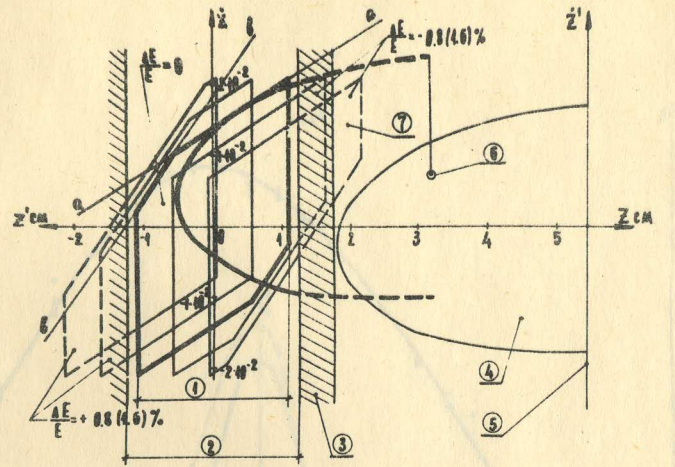
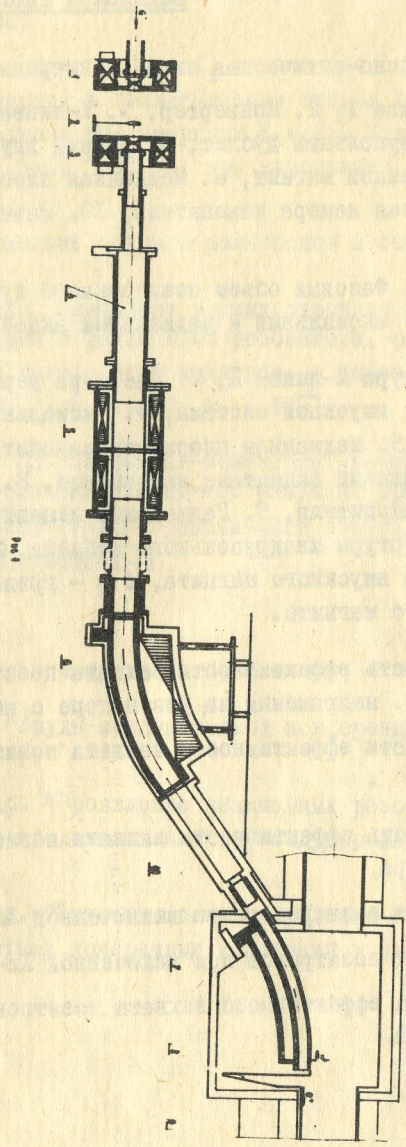


Рис. 2а

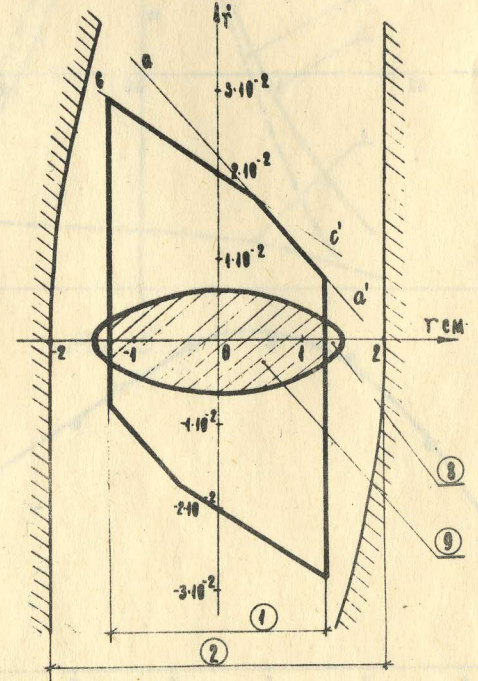


Рис. 2б

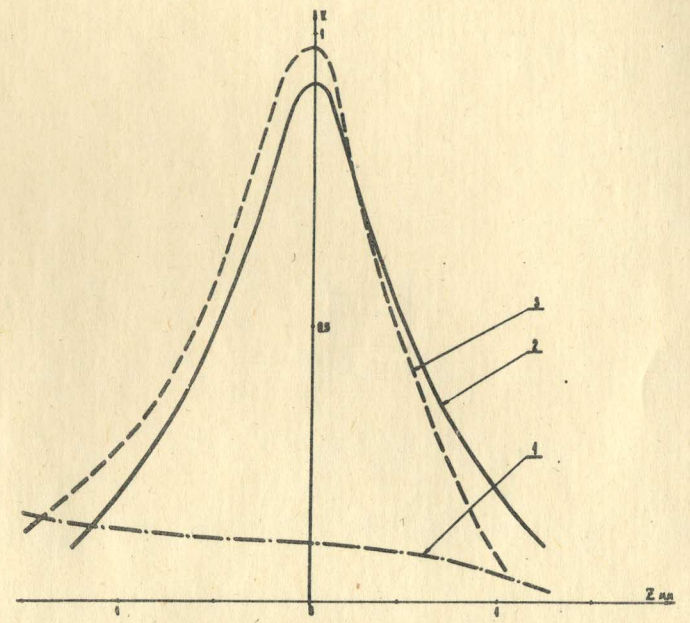
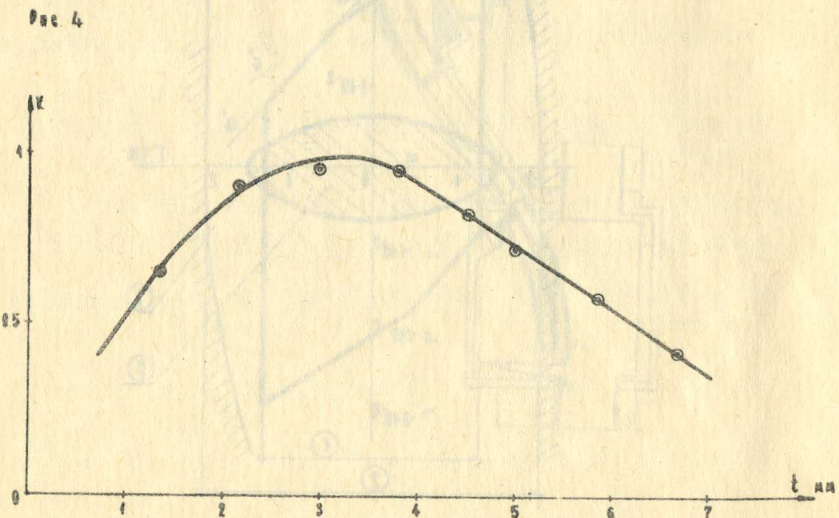
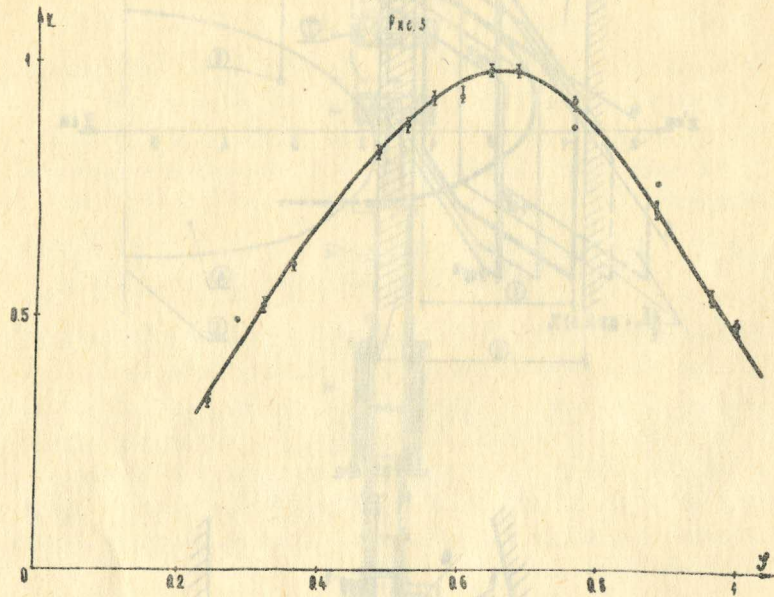


Fig. 5

Ответственный за выпуск Данилов А.А.

Подписано к печати

1966 г.

Тираж 200 экз.

Отпечатано на ротационной машине в Институте ядерной физики СО АН СССР.

ВН