

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 ВЭПП-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 ВЭПП-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 $E_p \approx 0,5 \Gamma \approx 100$ 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 $A_r = 3$ 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 $A_z = \pm 37$ 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

