

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

1338/2-81

9-80-806

Н.Ю.Казаринов, А.Б.Кузнецов, Ю.Л.Обухов,
Э.А.Перельштейн, В.А.Прейзендорф, В.П.Саранцев,
В.Ф.Шевцов

ТРАНСПОРТИРОВОЧНО-ФОРМИРУЮЩИЙ КАНАЛ
ИНТЕНСИВНОГО ИОННОГО ПУЧКА КУТИ

1980

Ионный пучок, выходящий из КУТИ /1/, имеет специфическую тороидальную форму. В пространстве скоростей ионы также занимают тороидальный объем, так как, образуясь в электронном кольце, являются замагниченными. Тороидальная конфигурация не может быть устранена использованием ионной оптики с радиальными силами.

Транспортировочный канал ввиду особенностей кольца - источника имеет ряд специфических элементов. Его можно разбить на две части /рис. 1/: головную, содержащую специфические магнитные элементы /1;2/, и транспортировочную /4/, представляющую собой обычный жесткофокусирующий канал, обеспечивающий транспортировку пучка с большим током.

Специальный магнит /1/ устраняет момент у частиц пучка и превращает проекцию пучка в пространстве скоростей из тороидальной в шаровую. Специальная линза с азимутальным магнитным полем /2/ обеспечивает получение действительного или мнимого кольцевого изображения кольца-источника и одновременное азимутально-однородное сведение этого источника на ось так, что изображение тороида становится эллипсоидальным. В случае действительного изображения эта линза осуществляет также согласование с транспортировочным каналом по размеру - дает сильно увеличенное изображение /согласованный размер пучка в канале = 2 см/. В случае мнимого изображения действительное увеличенное изображение создается с помощью триплета /3/.

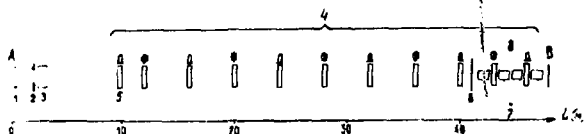


Рис.1. Схема канала транспортировки ионов из КУТИ в ТИС: 1 - специальный магнит для компенсации азимутальной скорости ионов, 2 - линза с азимутальным магнитным полем, 3 - фокусирующий триплет, 4 - жесткофокусирующий канал, 5 - согласующая квардрупольная линза, 6 - стрипер, 7 - индукционные ускоряющие секции монохроматора, 8 - участок канала с повышенной жесткостью. А - выход из КУТИ, В - место ввода пучка в ТИС.

Специальная линза, с помощью которой получается действительное увеличенное изображение, фактически состоит из двух линз с противоположными полями и со сложным профилем токовых поверхностей. В этих линзах азимутальное поле создается большим числом ~ 100 проводников, тонких в азимутальном направлении, так чтобы обеспечивалась хорошая прозрачность линз. Линза, дающая мнимое изображение, имеет поле одного знака и более простой профиль токовых поверхностей. В ней азимутальное поле формируется небольшим числом проводников ~ 30 . Эта линза конструктивно существенно проще, но, как уже отмечалось, требует дополнительно триплета с большой апертурой ≈ 25 см/.

Транспортировочная часть канала имеет структуру ФОДО и согласующую линзу $D/5$, смещенную на четверть периода. В канале используются квадрупольные такие же, как в ТИСе ^{1/2}.

По всему тракту канала проводится пучок ионов урана с $Z=25$, энергией 20 МэВ/нуклон $\beta=0,2$ и числом ионов в кольце $5 \cdot 10^{10}$. Ионное кольцо-источник имеет следующие начальные геометрические параметры: радиус кольца $R \approx 4$ см, радиус малого сечения кольца $a \approx 0,1$ см, радиальная угловая расходимость в пределах $\gamma_{r0} \approx \pm 6$ мрад, азимутальный угол, определяемый замагниченностью ионов, $\gamma_{\phi 0} \approx 0,5 \cdot |\gamma_{r0}| \approx 3$ мрад.

Магнит ^{1/1} располагается как можно ближе к месту сброса электронов ~ 20 см/, и поле в нем настраивается так, чтобы на выходе средний азимутальный угол ионов $\gamma_{\phi} = 0$. Тогда в дальнейшем величина поперечной проекции ионного пучка на плоскость r, γ_r сохраняется и представляет собой в начальный момент эллипс с центром в точке $r=R; \gamma_r=0$, полуосями a и γ_{r0} и площадью $\epsilon_0 \approx 0,6 \cdot \pi$ мрад·см. В то же время в декартовой системе координат пучок имеет поперечную проекцию фазового объема, соответствующую эффективному эмиттансу $\sim 60 \cdot \pi$ мрад·см.

Учет влияния собственных кулоновских сил на движение ионов в канале проводился методом крупных частиц. В головной части канала каждая крупная частица имела вид растяжимого по радиусу кольца. В транспортировочной части канала расчет велся двойкой. В одной программе расчет проводился методом моментов с эффективной линеаризацией сил пространственного заряда ^{3/}. В другой программе крупные части представлялись точками, распределенными в цилиндрическом объеме.

Расчет показал, что собственные кулоновские силы ионного пучка существенно увеличивают его эффективный эмиттанс и сброс продольных скоростей. Так, линза со встречными азимутальными полями, сечение токовых поверхностей которой изображено на рис. 2, расположенная в 2 м от источника, дает на расстоянии 10 м от источника круглый пучок со следующими параметрами: радиус сечения $R_{11} = 2,2$ см, эффективный эмиттанс $\epsilon_{эф} \approx 7 \cdot \pi$ мрад·см

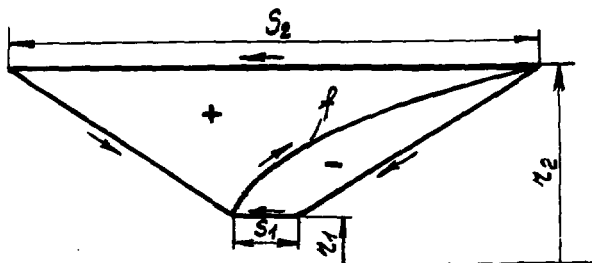


Рис.2. Конфигурация токовых поверхностей линзы с азимутальным полем, дающей действительное увеличенное изображение. Стрелками указано направление токов. "+" - область поля, отклоняющего ионы к оси, "-" - область поля, отклоняющего ионы от оси, f - разграничивающая токовая поверхность с удвоенным током /определяется формулой /2/.

/без кулона $\epsilon_{эф} = 2 \cdot \pi \text{ рад} \cdot \text{см} /$, продольный размер $2l_0 = 40 \text{ см}$ и разброс продольных скоростей $\frac{\Delta v_z}{v_{z0}} = 0,025 \cdot \frac{z}{r_0}$, где z - продольная координата в сгустке, отсчитываемая от его центра.

Параметры линзы равны: $\frac{S_2}{S_1} = 9$, $r_1 = 2 \text{ см}$, $r_2 = 8 \text{ см}$; уравнение параболы, разграничивающей встречные поля, имеет вид

$$r = \frac{S_1}{2} \left[1 - \frac{r}{r_1} + \frac{r}{r_1} \left(\frac{r}{r_1} - 1 \right) \frac{\frac{r_2}{r_1} + \frac{S_2}{S_1}}{\frac{r_2}{r_1} \left(\frac{r_2}{r_1} - 1 \right)} \right]. \quad /2/$$

Величина S_1 и полный ток I во внешнем контуре выбираются из соотношения $S_1 I = 700 \text{ кАсм}$. По разграничивающей параболе протекает ток, в 2 раза больший. В этой линзе токовые поверхности должны реализоваться -100 токовыми контурами.

Аналогичный результат можно получить с помощью линзы, дающей мнимое приосевое изображение, сечение токовой поверхности которой изображено на рис. 3. Уравнение токовой поверхности такой линзы записывается в виде

$$r^* = \pm \frac{S_0}{2} \frac{r}{r_0} \left(2 - \frac{r}{r_0} \right), \quad /3/$$

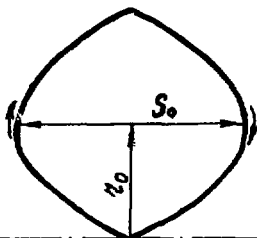


Рис. 3. Конфигурация токовых поверхностей линзы с азимутальным полем, дающей мнимое приосевое изображение. Граница определяется формулой /3/.

где $r_0 = 4,6$ см, а величина $S_0 I = 3300$ кАсм. В этом случае после линзы должен стоять триплет с диаметром апертуры ~ 25 см, обеспечивающий круглое действительное увеличенное изображение.

Пучок ионов урана со следующими параметрами: зарядность $Z=25$, $N = 5 \cdot 10^{10}$, $\beta=0,2$, $R_{II}=2,2$ см, $r_{\text{эф}}=7 \cdot \pi$ мрад·см, $r'_0 = 20$ см, $\frac{\Delta v_z}{v_{z0}} = 0,025 \cdot \frac{Z}{r'_0}$, $I_0 = 30$ А - проводился через жесткофокусирующий канал со структурой ФОДО и согласующей по углам линзой Д. Вначале параметры канала и согласующей линзы выбирались по формулам согласованного пучка в гладком приближении для начального тока $I_0^{/4}$ и корректировались по результатам расчетов, в которых учитывалась реальная структура канала и пучка и уменьшение тока по линейному закону вследствие его расплывания. Результаты расчета обоими методами находят в хорошем согласии и показывают уменьшение среднего радиуса пучка вдоль канала. Выбрана структура с периодом 8 м, длиной 32 м. На рис. 4 приведены огибающие во взаимно перпендикулярных плоскостях. Как видно, радиальный размер пучка не превышает 4 см при радиусе апертуры линз 7 см. Расчет показал также, что канал имеет двукратный запас по току пучка, что важно, так как в реальном пучке распределение плотности ионов вдоль сгустка неравномерно и в центре она приблизительно в 2 раза больше средней.

Так как в ТИС эффективно может быть захвачен пучок с разбросом по скоростям $\frac{2\Delta v_z}{v_{z0}} \sim 6 \cdot 10^{-3}$ /2/, то на последнем участке транспортировочного канала необходимо располагать монохроматор /7/, состоящий из индукционных ускоряющих секций /5/ с линейно нарастающим во времени электрическим полем.

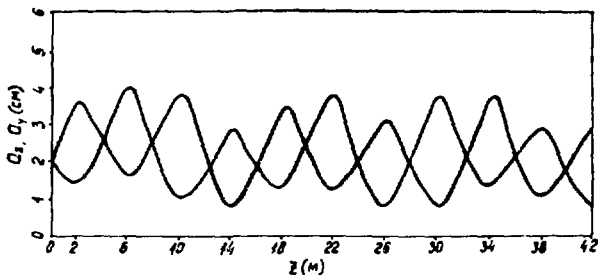


Рис. 4. Огибающие пучка в жесткофокусирующем канале структуры ФОДО с периодом 8 м и согласующей линзой Д на расстоянии 2 м перед каналом.

Перед монохроматором ставится обдирочная мишень /6/ ^{1/2}, повышающая зарядность ионов с 25 до 80. Структура канала после обдирочной мишени /8/ выбирается в 1,5-2 раза более жесткой, чтобы обеспечить согласованность пучка с увеличивающимся током. Так как необходимая протяженность монохроматора согласно расчетам должна составлять 6-9 м /6-8 ускоряющие секции длиной по 1м/, то обдирочную мишень нужно располагать приблизительно на 40 ± 45 м от выхода пучка из КУТИ.

Сформированный на выходе канала пучок ионов урана оказывается достаточно хорошо согласованным с ТИСом, т.к. только ионы трех зарядностей захватываются в ТИС, а остальные теряются вблизи места инжекции.

Таким образом, рассчитанный транспортировочный канал обеспечивает преобразование эффективного эмиттанта до величины 7-π мрад см и транспортировку практически без потерь /потери менее 10% имеют место на стоящих на пути пучка деталях линзы /2// интенсивного ионного пучка на расстояние 50 м и эффективную его инжекцию в ТИС.

Насыщенность канала магнитными элементами в пять раз меньше, чем в ТИСе, и, следовательно, его стоимость приблизительно в 15 раз меньше стоимости магнитной системы ТИСа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев А.И. и др. ОИЯИ, 9-11007, Дубна, 1978.
2. Балдин А.М. и др. ОИЯИ, 9-11796, Дубна, 1978.
3. Вялов Г.Н. и др. ОИЯИ, Р9-11672, Дубна, 1978.

4. Капчинский И.М. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. Атомиздат, М., 1966.
5. Вахрушин Ю.П., Анацкий А.И. Линейные индукционные ускорители. Атомиздат, М., 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 декабря 1980 года.