

Измерение трехмерного распределения частиц в сгустке на линейном ускорителе ЦЕРН

С.К. Есин, В.А. Гайдаш, А.В. Лию, А.Н. Мирзоян, А.А. Меньшов, А.В. Новиков,
П.Н. Остроумов, А.В. Фещенко
Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия
О. Дюбуа, Д. Вильямс, Х. Куглер, Л. Соби
ЦЕРН, Женева, Швейцария

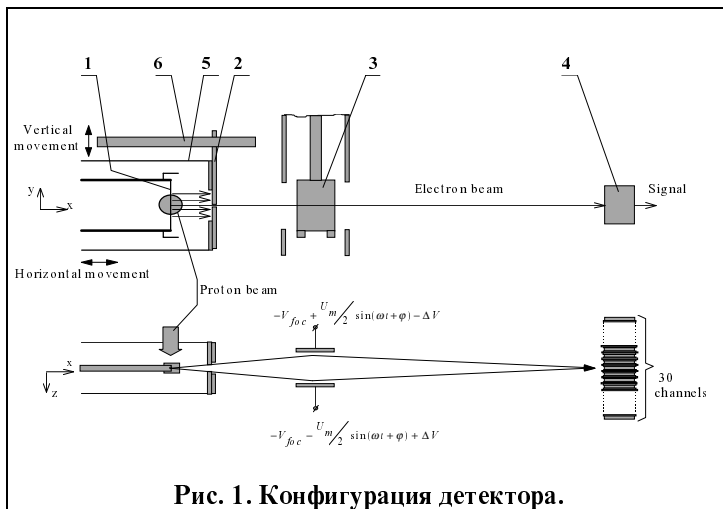
Представлены результаты создания детектора для измерения распределения плотности частиц в сгустках ускоренного пучка в реальном трехмерном пространстве. В приборе производится анализ вторичных электронов, образующихся при взаимодействии исследуемого пучка с тонкой проволочной мишенью, находящейся под потенциалом -10 кВ. Выделение точки в поперечной плоскости осуществляется за счет горизонтального перемещения вертикальной проволочки и вертикального перемещения горизонтального коллиматора, находящегося вне области пучка. Продольное распределение выделенных электронов измеряется обычным путем, как это реализовано в анализаторах фазового спектра, разработанных в ИЯИ ранее. Детектор установлен на линейном ускорителе протонов ЦЕРН. Приведены некоторые результаты первых измерений.

Введение

Распределение частиц в реальных сгустках ускоренного пучка описывается трехмерной функцией распределения $I(x, y, z)$ или $I(x, y, \varphi)$. Известные диагностические устройства позволяют измерять лишь проекцию данного распределения на одну из координатных осей или плоскость. Первое предложение по измерению трехмерной функции распределения описано в работе [1]. Это предложение было модернизировано и доведено до конкретной практической реализации при разработке в Институте ядерных исследований РАН трехмерного измерителя формы сгустков (3D-BSM) для линейного ускорителя протонов ЦЕРН Linac-2 [2]. Linac-2 состоит из ускоряющей секции ПОКФ и трех резонаторов с трубками дрейфа. Выходная энергия составляет 50 МэВ, а импульсный ток в номинальном режиме работы — 140 мА. В настоящее время детектор 3D-BSM установлен на выходе ускорителя и используется для углубленных исследований динамики пучка [3].

Конфигурация, конструкция и параметры детектора

Конфигурация 3D-BSM представлена на рис.1. Исследуемый пучок пересекает мишень 1 (вольфрамовая нить диаметром 0.1 мм), находящуюся под потенциалом -10 кВ, и выбивает вторичные низкоэнергетические электроны. Благодаря высокой напряженности электрического поля в области мишень - горизонтальный коллиматор 2 электроны движутся практически горизонтально, сохраняя вертикальную координату вылета из мишени Y_0 . При фиксированных координатах мишени X_0 и щели коллиматора Y_0 интенсивность электронов, прошедших через щель, пропорциональна плотности частиц исследуемого пучка в фиксированной точке поперечной плоскости. Далее временная (продольная) структура или фазовый спектр выделенных электронов преобразуется в пространственную путем поперечной когерентной модуляции в ВЧ-дефлекторе 3, совмещенном с электростатической линзой, подобно анализаторам фазового



потока электронов после коллиматора, а также к искажению распределения электростатического поля и, следовательно, нарушению временной структуры пучка электронов. Для предотвращения этих эффектов мишень окружена электростатическим экраном 5, который перемещается горизонтально вместе с мишенью 1, и пластиной коллиматора 2. Пластина движется по направляющей 6, которая может перемещаться в вертикальном направлении, обеспечивая вертикальное перемещение коллиматора, причем, независимо от его горизонтального движения вместе с мишенью и экраном. В этом случае условия движения электронов на участке мишень—коллиматор сохраняются независимо от положения мишени. Изменение расстояния от коллиматора до дефлектора хотя и приводит к фазовым сдвигам измеряемых продольных распределений, однако этот эффект легко учитывается и может быть скомпенсирован, например, соответствующим сдвигом фазы отклоняющего поля.

Нарушение оптимальных условий фокусировки электронов вследствие изменения расстояния от источника (мишени) до линзы приводит к зависимости фазового разрешения от положения мишени, однако для данного прибора этой зависимостью можно пренебречь. Упрощенный сборочный чертеж детектора показан на рис. 2.

Для детектора разработана автономная система контроля на основе персонального компьютера и одного крейта VME. Нестандартные электронные устройства занимают дополнительно два крейта КАМАК. Использование для регистрации сигналов пяти восьмиканальных АЦП типа STR 750 позволяет измерять все сигналы одновременно с дискретностью 0,25 мкс. Это дает возможность наблюдать поведение трехмерной функции распределения в течение импульса тока пучка, т.е. фактически измеряется не трехмерная, а четырехмерная функция $I(x, y, \varphi, t)$. Длительность полного измерения зависит от числа точек в поперечной плоскости. Так, при 20 точках по вертикали и 20 точках по горизонтали непосредственно для измерений требуется 420 импульсов работы ускорителя, что соответствует 504 секундам. Дополнительно требуется 1 минута для подготовительных операций и 5 минут для первичных преобразований измеренных данных. Объем информации, получаемой при одном измерении, составляет 1,5 Мбайт.

Основные параметры детектора приведены в таблице 1.

спектра, разработанным в ИЯИ РАН ранее. Пространственная структура анализируется с помощью тридцатиканального коллектора электронов 4. Перемещая мишень 1 и коллиматор 2 и всякий раз измеряя фазовый спектр пучка, можно получить функцию распределения частиц в трехмерном пространстве. При перемещении мишени, однако, происходит изменение геометрии, что приводит к изменению интенсивности

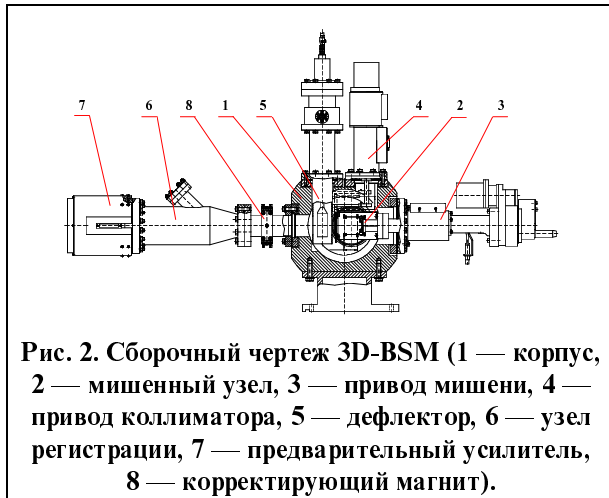


Рис. 2. Сборочный чертеж 3D-BSM (1 — корпус, 2 — мишенный узел, 3 — привод мишени, 4 — привод коллиматора, 5 — дефлектор, 6 — узел регистрации, 7 — предварительный усилитель, 8 — корректирующий магнит).

Таблица 1. Основные параметры детектора.

Разрешение по горизонтали	< 0,1 мм
Разрешение по вертикали	1 мм
Разрешение по фазе	< 1°
Диапазон измерений по горизонтали	± 10 мм
по вертикали	± 10 мм
Частота поля в дефлекторе	20 2,56 МГц
Потребляемая ВЧ - мощность	1,5 - 15 Вт
Минимальный импульсный ток анализируемого пучка	< 1 мА
Быстродействие усилительного тракта	2 - 3 мкс

Демонстрация возможностей детектора

В результате измерений получается четырехмерный массив $I(x_i, y_j, \varphi_k, t_i)$, который может быть использован для построения различных зависимостей. На рис. 3—10 приведены некоторые зависимости, построенные по результатам только одного измерения при стандартном режиме работы ускорителя (ток пучка 140 мА).

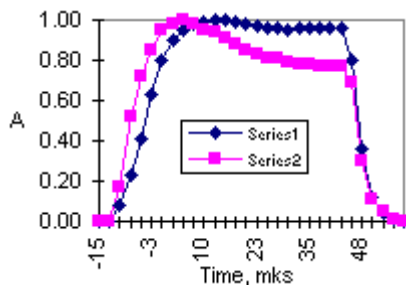


Рис. 3. Интегральная зависимость тока пучка от времени $A(t) = \int I(x, y, \varphi, t) dx dy d\varphi$ (1) и зависимость для частиц на оси пучка и в центре сгустка $A(t) = I(0, 0, \varphi_c, t)$ (2).

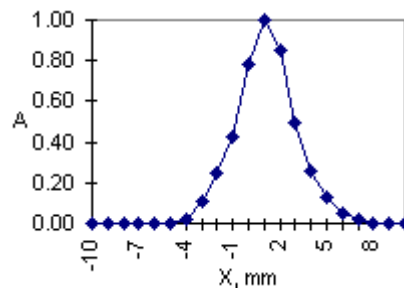


Рис. 4. Горизонтальный профиль пучка $A(x) = \int I(x, y, \varphi, t) dy d\varphi dt$.

Заключение

Разработанный измеритель трехмерного распределения частиц ускоренного пучка является принципиально новым диагностическим устройством. Получаемая с его помощью информация не может быть получена никакими иными известными средствами. Использование детектора позволяет более детально исследовать процессы, происходящие при ускорении пучка.

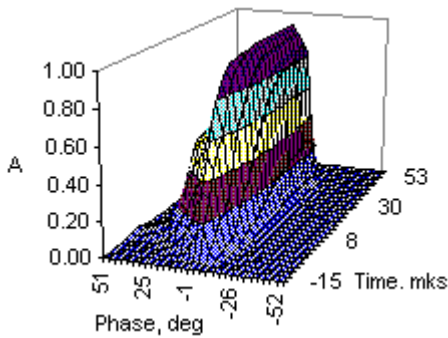


Рис. 5. Поведение интегрального фазового спектра в течение импульса

$$A(\varphi, t) = \int I(x, y, \varphi, t) dx dy .$$

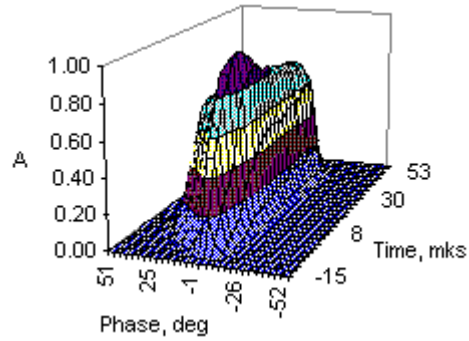


Рис. 6. Поведение фазового спектра в течение импульса для частиц оси пучка

$$A(\varphi, t) = I(0, 0, \varphi, t) .$$

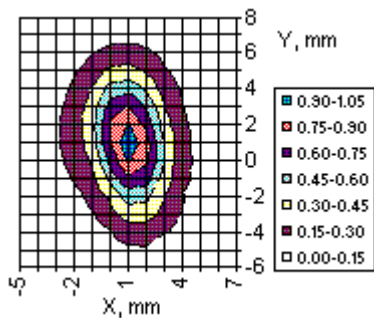


Рис. 7. Поперечное сечение пучка

$$A(x, y) = \int I(x, y, \varphi, t) d\varphi dt .$$

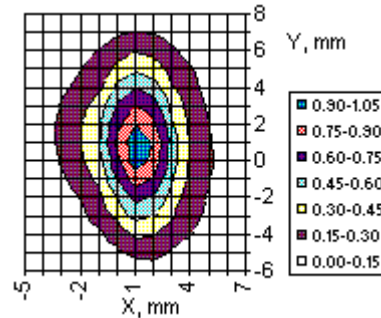


Рис. 8. Поперечное сечение пучка для частиц в центре сгустка

$$A(x, y) = \int I(x, y, \varphi_c, t) dt .$$

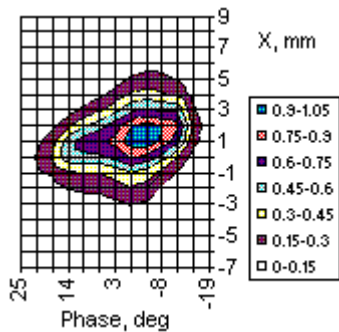


Рис. 9. Распределение частиц в плоскости (X, φ) : $A(x, \varphi) = \int I(x, y, \varphi, t) dy dt .$

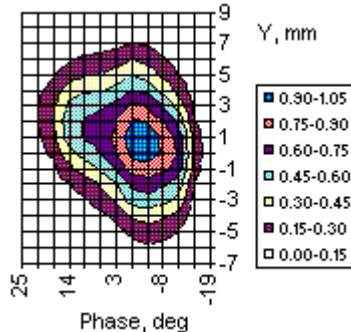


Рис. 10. Распределение частиц в плоскости (Y, φ)

$$A(y, \varphi) = \int I(x, y, \varphi, t) dx dt .$$

Литература

- [1] С.К. Есин, А.В. Фещенко, Измеритель трехмерной функции распределения плотности частиц пучка линейного ускорителя ионов. Труды 14-го Совещания по ускорителям частиц, т.2, Протвино, 1994, С.17-22.
- [2] O.Dubois et all. A Three Dimensional Bunch Shape Monitor For the CERN Proton Linac. Proc. of the Linac-96 Conf., Geneva, August 1996 (в печати).
- [3] O.Dubois et all. Study of Beam Parameters of the CERN Proton Linac Using a Three Dimensional Bunch Shape Monitor. Proc. of the Linac-96 Conf., Geneva, August 1996 (в печати).