

Получение протонного пучка наносекундной длительности на выходе линейного протонного ускорителя “Истра-10”

Р.М. Венгров, А.М. Козодаев, А.А. Коломиец, Ю.Г. Орлов, В.И. Першин,
В.К. Плотников

ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

Введение

Возрастающий интерес к определению состава материалов в различных сферах деятельности стимулировал разработку методики дистанционного элементного анализа, основанную на использовании ускоренных протонных пучков в наносекундном диапазоне длительности их импульсов. Такие протонные пучки при импульсе тока со спадом 1–10 нс, преобразованные в поток нейтронов, могут быть использованы для определения элементного состава материалов по анализу гамма-квантов от неупругого рассеяния нейтронов в исследуемом образце. Данная методика применима для пограничного контроля перемещения движущихся материалов, для определения элементного состава поверхностей планет, в частности луны, и в работах, связанных с решением проблемы трансмутации ядерных отходов. Особую актуальность представляет первое применение, так как на базе предлагаемой методики можно создать компактную, недорогую и экологически чистую установку, однозначно определяющую характер груза. Таким образом, значительный интерес представляет разработка способов формирования и ускорения ионных пучков наносекундной длительности.

Описание способа формирования наносекундного пучка

В ИТЭФ предложен способ [1], основанный на индукционном доускорении пучка, инжектируемого в линейный протонный ускоритель, до энергии, необходимой для захвата частиц в режим ускорения. Доускоряющий импульс имеет наносекундную длительность, которая, как и его форма, определяется внешними формирующими устройствами. При этом на инжекторе устанавливается ускоряющее напряжение меньше номинального на величину доускоряющего импульса. Реализовать этот способ легче всего на ускорителе, имеющем в начальной части (НЧ) ускоряющую секцию с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ), допускающей малую энергию инжекции пучка на ее входе.

Таким ускорителем в ИТЭФ является протонный ускоритель "Истра-10" с энергией инжекции пучка в начальную часть, равную 90 кВ. Ускоритель "Истра-10" [2] состоит из ионного источника (ИИ), начальной части (НЧУ) – секции ПОКФ, ускоряющей пучок до 3 МэВ, и секции Альвареца (ПЧУ), на выходе которой полная энергия пучка составляет 10 МэВ. Длительность импульса тока пучка 8 мкс, рабочие частоты в секции ПОКФ – 148,5 МГц, в секции Альвареца – 297 МГц.

В эксперименте по формированию наносекундного импульса тока пучка (рис.1) в промежуток между ионным источником и НЧУ устанавливался блок индукторов (БИ) – индукционный модуль из двух индукционных трансформаторов, выполненных на ферритовых сердечниках [3]. Внутри модуля закреплялся медный патрубок, свободный край которого и один из внешних фланцев индукторов образовывали ускоряющий зазор длиной 20 мм. Установка патрубка была

необходима, так как без него протоны с энергией 100 кэВ проходят участок доускорения с вихревым электрическим полем на длине блока индукторов L за время δt , определяемое формулой

$$\delta t = L/\beta c,$$

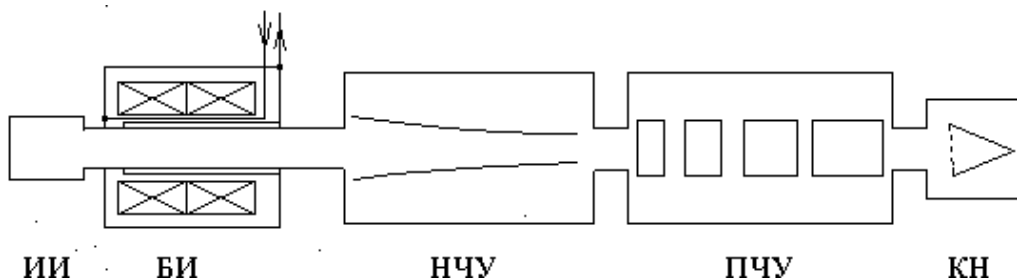


Рис. 1. Структурная схема формирования наносекундного импульса тока пучка.

что при $\beta = 0,01$ и $L = 220$ мм дает $\delta t = 220$ нс. Таким образом, протоны не успевают получить полную энергию от доускоряющего импульса длительностью 40 нс, и необходимо на порядок уменьшить длину доускоряющего зазора. Индукторы запитывались от импульсного модулятора с двойной формирующей линией (ДФЛ) типа Блюмлайн. С целью удешевления эксперимента в нем была использована готовая кабельная ДФЛ, обеспечивающая импульсы напряжением на индукторах до 15 кВ с длительностью 40 нс.

Для измерения тока пучка на выходе ускорителя использовался расположенный к камере наблюдения (КН) токоприемный коллектор конической формы, покрытый алюминиевой фольгой для поглощения низкоэнергетичной компоненты пучка. Сигнал с коллектора симметричным экранированным кабелем подавался на запоминающий осциллограф С8-14 и фотографировался. При этом уровень электротехнических наводок не превышал 0,01 В. Контроль токового импульса вдоль ускорительного тракта осуществлялся как на выходе ионного источника, так и на выходе НЧ с помощью индукционных датчиков.

В процессе работы на доускоряющем индукторе устанавливалось суммарное напряжение в 12 кВ. Изменение ускоряющего напряжения на ионном источнике позволяло последовательно отслеживать момент начала захвата пучка в режим ускорения секции ПОКФ, а также увеличение тока пучка при приближении к номинальному значению энергии инжекции.

Результаты измерений

Эксперимент проводился при ускорении пучка до энергии 3 МэВ в секции НЧУ при отсутствии ускоряющего ВЧ-поля в резонаторе Альвареца (ПЧУ). Таким образом, пучок проходил от выхода НЧУ до камеры наблюдения участок дрейфа длиной 5 м при сохранении фокусирующего поля в ПЧУ.

Первоначальная настройка ускорителя проводилась при номинальном ускоряющем поле на инжекторе равном 90 кВ. При этом проводилась настройка систем ускорителя, и обеспечивалась проводка пучка до камеры наблюдения. В камере регистрировались импульсы тока протонного пучка с энергией 3 МэВ и с большой длительностью (8 мкс). После этого напряжение на инжекторе снижалось до 75 кэВ, при этом в КН ток отсутствовал. Далее включался генератор

наносекундных импульсов, обеспечивающий доускоряющий импульс на инжекторе в 12 кэВ. При постепенном подъеме напряжения на инжекторе в КН появлялись импульсы тока пучка длительностью 40 нс.

На рис. 2 представлены осциллограммы импульсов тока пучка на выходе ускорителя, полученных при различных значениях ускоряющего напряжения на инжекторе, а также импульса доускоряющего напряжения. Сравнительно небольшое значение тока на входе в секцию с ПОКФ (50 мА), объясняется удалением ионного источника от секции из-за размещения между ними блока индукторов и нарушением при этом условий оптимальной фокусировки пучка до входа в НЧ. Из осциллограмм видно, что длительность импульса напряжения доускорения соответствует ≤ 40 нс, а его спад составляет 15-18 нс.

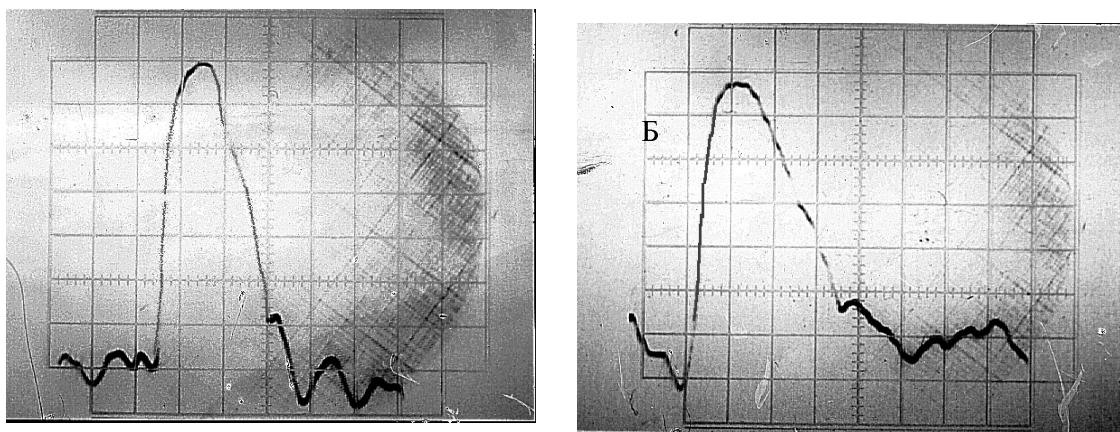


Рис. 2. Осциллограммы импульсов доускоряющего напряжения (А) и тока пучка на выходе ускорителя (Б). Цена деления по оси абсцисс 10 нс.

Уровень наводок в измеряемом сигнале составлял 20-25 % от его амплитуды, что затрудняло точное определение времени спада, однако ясно, что реально эта величина не хуже приведенных значений.

С целью уменьшения времени спада доускоряющего поля была реализована измененная схема модулятора, которая позволяет в определенный момент времени закорачивать питающие витки индукторов на землю и таким образом формировать крутой спад импульса доускоряющего напряжения. Длительность импульса определяется разностью длин кабелей, идущих на индукторы и на запускающий электрод разрядника. Спад импульса зависит от времени срабатывания разрядника и длины кабеля от разрядника до индуктора. Данная схема обеспечивала импульсы длительностью 5 - 10 нс.

Заключение

В проведенном эксперименте показана принципиальная возможность использования комбинации индукционного доускорения и структуры ПОКФ для получения наносекундных импульсных протонных пучков со спадом не хуже 10 нс. Данная методика легко реализуется на основе существующего в ИТЭФ оборудования: линейного протонного ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой и индукционной ускоряющей секции. Показан принципиальный путь уменьшения времени спада доускоряющего поля до 2-4 нс. Хотя эксперимент проводился при частоте импульсов 0,25 Гц, что определялось

режимом работы ускорителя, не существует принципиальных ограничений на увеличение частоты работы ускорителя до 25 Гц. Частоту срабатывания модуляторов наносекундных импульсных напряжений для индукционного доускорения можно поднять до 1000 Гц за счет использования модуляторов с магнитной компрессией импульсов и водородным тиратроном в качестве коммутирующего элемента.

Отечественные серийно выпускаемые тиратроны ТГИ-1000/25 имеют паспортную частоту в 2000 Гц. Дальнейший путь повышения средней частоты работы ускорителя состоит в увеличении длительности рабочего импульса. При этом на выходе ускорителя можно получить пакеты наносекундных импульсов, следующих с частотой работы доускоряющего модулятора.

Литература

1. Р.М.Венгров, В.К.Плотников. Приоритетная справка №94036276 от 17.10.94.
2. В.А.Андреев и др. “Подготовка и проведение физического пуска линейного протонного ускорителя “Истра-10”. Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1992, т. II, с. 57.
3. Е.Н.Данильцев, В.И.Першин. “Стенд для испытания холодных катодов”. Препринт ИТЭФ-57, М., 1978.