

Новая концепция радиационно-чистого высоконадежного сильноточного линейного ускорителя протонов *

В.А. Андреев, А.И. Балабин, Р.М. Венгров, И.А. Воробьев, А.А. Дроздовский,
А.М. Козодаев, А.А. Коломиец, Р.П. Куйбида, Н.В. Лазарев, В.И. Першин,
В.К. Плотников, А.М. Раскопин, И.В. Чувило.

ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия.

Введение

Проекты линейных протонных ускорителей (ЛПУ) высокой мощности (≤ 100 МВт), предназначенных для работы в составе ядерных энергетических установок, предлагаются в различных лабораториях [1,2].

Важнейшими проблемами, возникающими при создании таких ускорителей и их эксплуатации, являются разработка путей уменьшения уровня наведенной радиоактивности его узлов и обеспечение длительной безостановочной работы.

Исследования процессов образования ореола пучка — главной причины потерь частиц — ведутся во многих научных центрах мира [3,4]. К сожалению, несмотря на большое количество важных результатов, в ближайшем будущем не представляется возможным существенное уменьшение уже достигнутого уровня потерь ($\sim 10^{-4}$).

В связи с этим мы предлагаем некоторые новые идеи, открывающие путь к реализации высоконадежного ускорителя со средним током до 100 мА и достаточно малой активацией его узлов. Эти идеи состоят в том, что при создании ускорителя предусматривается максимально широкое использование материалов с низкой активацией и малым выходом нейтронов, а также построение основной части ускорителя (ОЧУ) из отдельных однозачерных резонаторов с индивидуальным ВЧ-питанием и внешней фазировкой ускоряющих полей.

Структурная схема и параметры ускорителя

В большинстве проектов ускорителей высокой мощности в качестве начальной части (НЧУ) принята структура RFQ, а для промежуточной части ускорителя (ПЧУ) — структуры с трубками дрейфа и квадрупольными линзами, размещенными внутри трубок или вне резонаторов (BCDTL, CCDTL и т.д.). Для ОЧУ обычно предлагаются хорошо испытанные структуры CCL и DAW, работающие на частоте 700 — 1000 МГц. Однако малая величина коэффициента связи между ячейками CCL может сделать затруднительным использование этой структуры для ускорения пучка с большим средним током [5]. Основными недостатками резонаторов DAW являются относительная сложность их изготовления и настройки, а также трудности отвода тепла при работе на высоком уровне средней мощности.

Блок-схема ЛУ, в которой предполагается реализовать предложения ИТЭФ, приведена на рис. 1.

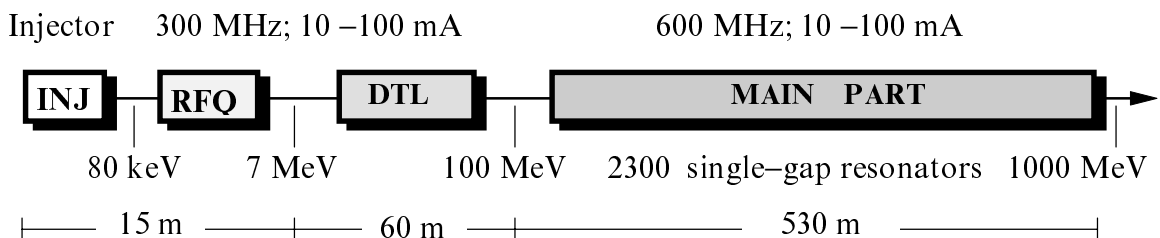


Рис.1. Блок-схема ЛПУ на ток 10 - 100 мА и энергию 1000 МэВ.

* Работа выполнялась при финансовой поддержке ИСТС.

Ускоритель состоит из инжектора, начальной части с RFQ структурой, промежуточной части типа Альвареца и основной части, состоящей из 2300 однозачерных резонаторов. Основные параметры ускорителя приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметр	НЧУ	ПЧУ	ОЧУ
Тип ускоряющей структуры	RFQ	DTL с PMQ	Одиночные резонаторы
Энергия (МэВ)	0.08 – 7	7 – 100	100 – 1000
Частота (МГц)	300	300	600
Число резонаторов. ВЧ-одулей	2	5	2300
Общая длина (м)	10	60	530
Синхронная фаза (град)	90 – 30	30	30
Шунт импеданс (МОм/м)	-	35	21 – 35
Мощность потерь в меди (МВт)	0.8	7.5	35
Мощность в пучке для тока пучка 100/10 мА (МВт)	0.7 / 0.07	9.3 / 0.93	90 / 9
Число ВЧ генераторов	2	20	2300
Электронный КПД %	47	55	72
Тип фокусировки	FD	FODO	FODO
Градиент поля магнитных линз (Т/м)	-	56–23	18.5 - 16.9

В НЧУ используется RFQ с окнами связи [6]. Так как в RFQ параметры пучка меняются во времени с частотой ВЧ-поля, то на выходе НЧУ использовано устройство, преобразующее пучок с зависящими от времени параметрами, в пучок с независящими от времени параметрами, что обеспечивает наилучшее его согласование с последующей ускоряющей структурой [7].

Решение радиационных проблем возможно обеспечить не только путем снижения потерь частиц, но и за счет применения материалов, имеющих значительно меньший выход наведенной радиоактивности [8]. Таким материалом является, например, графит, для которого существуют развитые технологии использования в радиационной технике.

Принципиальная возможность применения графита в конструкциях ускорительного тракта вытекает из физических особенностей процесса потерь частиц в ускорителе. Так как ускоряемый пучок имеет малый фазовый объем, то теряемые частицы падают на внутреннюю стенку с углом скольжения менее 10 мрад и, следовательно, их траектории проходят в тонком поверхностном слое. Глубина проникновения протонов увеличивается из-за многократного кулоновского рассеяния протонов на атомах стенки. Для графита, как показывают расчеты, ее величина при энергиях ≤ 100 МэВ составляет доли миллиметров, а при энергиях 1000 МэВ достигает нескольких миллиметров.

Если в ускорительной структуре в области поглощения потерянных частиц максимально сократить использование меди, заменяя ее графитом (в котором и будут поглощаться теряемые частицы), то уровень радиоактивности будет резко понижен. До энергии 25 МэВ ускоритель становится практически радиационно чистым. В этом энергетическом диапазоне остаточная радиация обусловлена радионуклидами ^{13}N и ^{11}C с периодами полураспада 10 и 20 мин соответственно и, следовательно, радиация вблизи ускорителя быстро снижается до допустимого уровня.

Фокусировка пучка в ПЧУ осуществляется магнитотвердыми квадрупольями (МТК). Возможность использования МТК обеспечивается за счет применения в трубках дрейфа вставок из графита, защищающих магнитный материал линз от

вредного воздействия облучения из-за потерянных частиц пучка. Графитовый поглотитель размещается внутри ускорительных трубок.

Ускоряющий модуль в начале ОЧУ схематически показан на рис. 2. ОЧУ состоит из групп однозачорных резонаторов тороидальной формы, между которыми расположены квадрупольные фокусирующие линзы. Резонаторы изготовлены из графита. Их внутренняя поверхность покрыта медью толщиной ~ 0.1 мм, что с одной стороны обеспечивает необходимую электропроводность, а с другой — улучшает вакуумные условия. Длина периода фокусировки в ОЧУ равна $8\beta\lambda$. При этом число резонаторов в группе в начале ОЧУ равно 3, в конце — 6. Элементы ионпровода внутри линз выполняются из толстостенных углеродных трубок, толщина стенок которых постепенно возрастает от 2 до 20 мм.

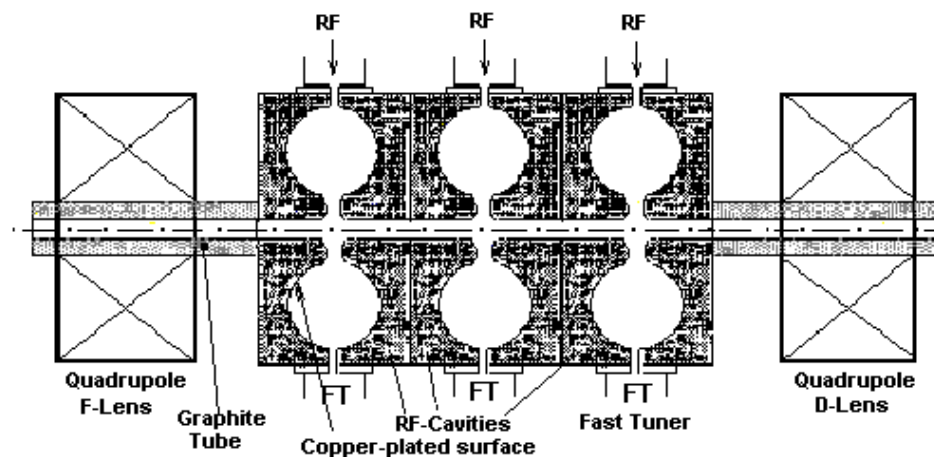


Рис. 2. Схематический вид ускоряющего модуля ОЧУ.

Главным достоинством ОЧУ из однозачорных резонаторов является то, что ЛУ сохраняет свою работоспособность даже при выходе из строя нескольких расположенных подряд резонаторов. Даже без принятия специальных мер в случае отсутствия по каким-либо причинам ускорения в любом из резонаторов пучок остается в области устойчивости на последующем участке ускорения. При этом колебания выходной энергии частиц не будут превышать размаха сепаратрисы, что не нарушит работоспособности мишенно-бланкетного комплекса даже при наличии поворотных магнитов в канале вывода и распределения пучка. Независимое возбуждение каждого резонатора позволяет устранить вариации энергии и возникающие продольные когерентные колебания частиц за счет изменения фазы (амплитуды) ВЧ-поля, при которой пучок проходит ускоряющие зазоры, следующие за дефектным.

Проведенные расчеты показывают, что ОЧУ, построенная из однозачорных тороидальных резонаторов, работающих на частоте 600 МГц, по эффективному шунт-импедансу не уступает таким структурам, как ССЛ и DAW. В отличие от многозачорных резонаторов в этом случае полностью отсутствуют проблемы, связанные с настройкой и стабилизацией ускоряющих полей в резонаторе.

Для питания однозачорных резонаторов потребуются ВЧ-генераторы мощностью не более 55 кВт (при среднем токе пучка 100 мА), которые можно расположить за защитой в непосредственной близости от резонаторов. Ввод в резонаторы ВЧ-мощности такого уровня не представляет трудностей, при этом не потребуется сложной и дорогостоящей фидерной системы.

Использование однозачорных резонаторов позволяет наилучшим образом реализовать идею применения специальных материалов для поглощения потерянных частиц. Были сделаны оценки, показывающие возможность изготовления резонатора ОЧУ целиком из графита. Например, использование мелкозернистого пирографита, обладающего значительной механической прочностью, высокой теплопроводностью, способностью образовывать с медью прочное соединение, позво-

ляет создать резонатор для работы в непрерывном режиме с характеристиками, не уступающими резонаторам, изготовленным из обычных материалов.

В ОЧУ из однозачорных резонаторов длина и тип периода фокусировки выбираются только исходя из требований минимизации потерь пучка.

Заключение

Реализация рассмотренных выше предложений по построению сильноточного ЛУ позволит преодолеть физическое ограничение на величину потерь частиц, представляющее собой основное препятствие для увеличения интенсивности пучка от 1 до 100 мА. Устранение зависимости надежности комплекса ускоритель — мишень от надежности ВЧ-системы ЛУ позволяет легко достичь высокого уровня безотказной работы. К основным достоинствам данной схемы следует отнести:

- Возможность создания сильноточного ускорителя при относительных потерях пучка близких к 10^{-4} - 10^{-5} .
- Исключение остановок ускорителя в случае неисправностей ВЧ-генераторов и резонаторов ОЧУ.
- Уменьшение общей длины ускорителя до 600 м за счёт увеличения темпа ускорения в оконечной части.
- Малую мощность ВЧ-генераторов ОЧУ, что открывает путь к использованию твёрдотельных генераторов с высоким КПД.
- Возможность применения магнитотвёрдых линз в секции DTL.
- Высокую степень свободы в компоновке элементов ускорительного тракта, прежде всего фокусирующих линз.
- Простоту настройки ускоряющих полей в резонаторах ОЧУ и снятия проблемы ввода в них ВЧ-мощности.
-

Литература

- [1] Kapchinsky I.M., et al., " Linear Accelerator for Plutonium Conversion and Transmutation of NPP Wastes ", in *Proc. of the 1993 Particle Accelerator Conf.*, Washington, pp. 1675-1680.
- [2] Lawrence G.P., " Los Alamos High-Power Proton Linac Designs ", in *Proc. of the Intern. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation. Technologies and Applications*, Las Vegas, 1994, pp.177-186.
- [3] Reiser M., " Beam Physics Design Strategy for a High-Current RF Linac ", Ref.2, pp.364-370.
- [4] Kolomiets A.A., " The Study of Nonlinear Effects Influenced by Space-Charge in High-Intensity Linac ", presented at *1995 Particle Accelerator Conference*, Dallas.
- [5] Andreev V.G., Paramonov V.V., " The Distortion of the Accelerating Field Distribution in Compensated Structures due to Steady-State Beam Loading ", presented at *1995 Particle Accelerator Conference*, Dallas.
- [6] Andreev V.A. and Parisi G., "90°-apart-stem RFQ Structure for Wide Range of Frequencies", Ref.1, pp. 3124-3126.
- [7] Vorobjov I.A., Kolomiets A.A., "Matching of RFQ Beam with Periodic Focusing Structures", in *Proc. of the 1994 Intern. Linac Conf.*, Tsukuba, pp. 558-560.
- [8] Drosdovsky A.A., "Induced Radioactivity Decrease Method in High-Intensity Ion Linacs", presented at *EPAC-96 Intern. Conf.*, Barcelona, June 10-14, 1996.