

Накопитель дейтронов для источника нейтронных потоков

А.Г. Уфимцев

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Один из возможных вариантов интенсивного нейтронного генератора базируется на использовании циклического накопителя дейтронов с “тонкой” внутренней нейтронообразующей мишенью [1 ÷ 3]. Реализация такого способа генерации нейтронных потоков обеспечивает более эффективное использование ускоренных заряженных частиц в результате того, что взаимодействие ускоренной частицы с мишенью происходит практически при постоянной энергии. Магнитная структура соответствующего накопителя в значительной степени определяется необходимостью размещения нейтронообразующей мишени и блока облучаемого вещества, т.е. наличием свободного места между элементами магнитной структуры. Кроме того, структурные функции накопителя в месте размещения мишени должны быть минимальны, что снижает темп роста размеров пучка, обусловленного многократным рассеянием дейтронов в мишени.

Исходя из этих соображений, с помощью пакета MAD [4] был проведен расчет магнитной структуры циклического накопителя дейтронов на энергию 100 МэВ. Общий вид накопителя схематически изображен на рис.1.

Предполагается перезарядный вариант инжекции отрицательных ионов дейтерия D^- , ускоренных в линейном или в циклическом ускорителе до необходимой энергии (в данном случае до 100 МэВ). Отличие данного накопителя от описанного в ранее опубликованных работах [1 ÷ 3] состоит прежде всего в увеличении числа свободных промежутков и их величины, что облегчит тепловой режим мишени [5]. Магнитная структура накопителя состоит из 4 периодов, каждый из которых содержит прямолинейный промежуток длиной около 10 м и дипольный магнит. В свою очередь, каждый прямолинейный

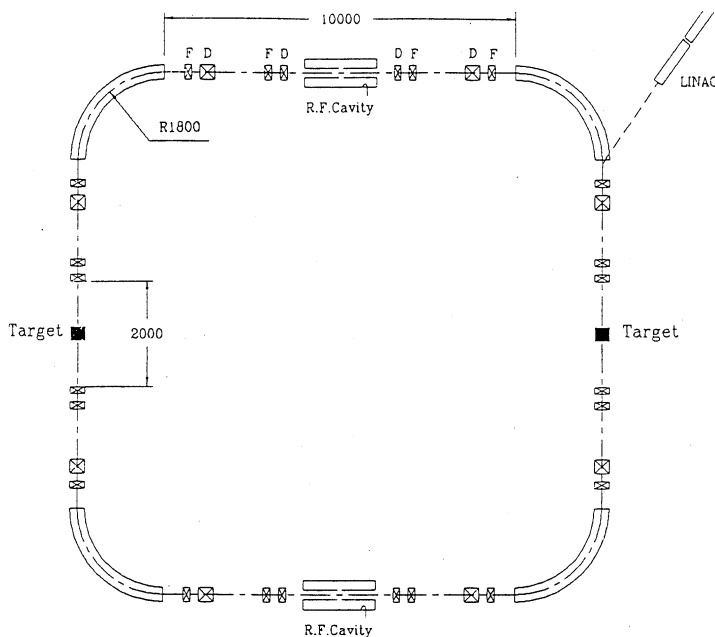


Рис. 1: Схема накопителя дейтронов.

промежуток заполнен магнитооптическими элементами (квадрупольными линзами), обеспечивающими минимум огибающих в центре промежутка. Максимальная длина свободного промежутка составляет в данном случае 2 м. Два промежутка предназначены для размещения нейтронообразующей мишени (например, бериллиевой) и блока вещества, в котором происходит размножение и замедление первичных нейтронов.

В двух других промежутках размещаются высокочастотные резонаторы для компенсации ионизационных потерь энергии в веществе мишени. Амплитуда ВЧ-напряжения V определяется величиной ионизационных потерь энергии:

$$V = \frac{\Delta E}{\cos \phi_s}, \quad (1)$$

где $\Delta E = 4\pi n r_e^2 E_e^2 Z \{ \beta^{-2} \ln [2E_e \beta^2 \gamma^2 (IZ)^{-1}] - 1 \}$ — величина ионизационных потерь энергии [6] при однократном прохождении мишени с оптической плотностью n (атом/см²). Причем равновесная фаза ВЧ-напряжения ϕ_s выбирается исходя из условий отсутствия синхротронного резонанса ($m\Omega \neq Q - k$) и превышения области устойчивости фазовых колебаний над энергетическим разбросом инжектированного пучка ($\Delta E_{sep} > \Delta E_{inj}$).

Наличие нейтронообразующей мишени на орбите циклического накопителя приводит к росту поперечных размеров инжектированного пучка, т.е. определяет и поперечные размеры вакуумной камеры накопителя. В частности, в области размещения мишени сечение вакуумной камеры описанного накопителя равно 7 x 8 см; причем размеры вакуумной камеры (и апертура соответствующих магнитных элементов) могут меняться в соответствии с ходом β -функции (рис.2).

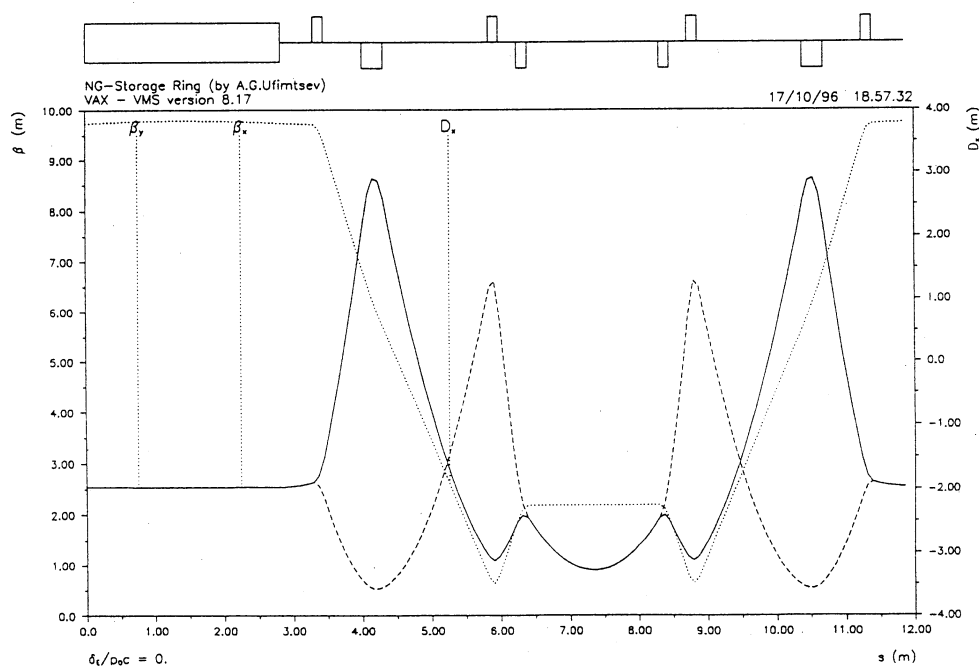


Рис. 2: Структурные функции накопителя.

Некоторые параметры описанного накопителя дейтронов приведены в табл.1.

Соответствующий нейтронный источник может обеспечить потоки до $6 \cdot 10^{16}$ нейтрон/с с каждой бериллиевой фольги толщиной 0.4 мм. Следует заметить, что найденные параметры элементов магнитной структуры позволяют использовать магнитотвердые материалы [7], в частности для формирования ведущего магнитного поля, что весьма существенно для оборудования, работающего при высоких радиационных нагрузках.

Таблица 1: Основные параметры накопителя дейтронов.

№	Наименование параметра	Значение
1	Энергия дейтронов, E	100 МэВ
2	Ток инжекции в накопитель, i	100 мА
3	Накопленный ток, I	14 А
4	Полная оптическая плотность мишени, n	10^{22} атом/см ²
5	Ионизационные потери энергии, ΔE	1.55 МэВ/оборот
6	Амплитуда ускоряющего напряжения, V	1.8 МВ
7	Индукция магнитного поля в поворотных магнитах, B	11.55 Т
8	Апертура магнитов, a	0.12 м
9	Длина магнитной дорожки, L_{mag}	11.3 м
10	Градиенты квадруполей:	
	- G_1	13.628 Т/м
	- G_2	-7.484 Т/м
	- G_3	23.617 Т/м
	- G_4	-19.435 Т/м
11	Коэффициент уплотнения орбит, α	0.505
12	Частоты бетатронных колебаний, Q_x/Q_y	4.7/3.4

Взаимодействие дейтронов с мишенью сопровождается образованием нейтронов со средней энергией $E_d/2$. Для многих прикладных целей (наработка изотопов, трансмутация отходов АЭС и т.д.) энергия нейтронов должна составлять величину порядка 1 МэВ и менее. Для получения интенсивных нейтронных потоков в этой области энергии нейтронообразующая мишень должна быть окружена веществом, в котором происходит замедление (и размножение) нейтронов. В этом случае предпочтительность использования дейтронов становится более очевидной, поскольку облучение размножающей среды производится как заряженными частицами (протонами), так и нейтронами с энергиями, достаточными для последующего эффективного размножения. В качестве такого вещества могут быть использованы, например отходы АЭС, содержащие смесь ^{90}Sr и ^{137}Cs .

Список литературы

- [1] Yu.M.Ado, E.F.Avdeev, S.L.Dorohovich et al. Neutron production by deuteron-deuterium interaction in a gas target. // Kerntechnik, vol.56 (1991), №3, pp.190-195.
- [2] Yu.M.Ado, A.G.Ufimtsev, V.V.Artisyuk et al. Possibility of realization of ecologically acceptable fuel cycle on the basis of deuteron high-toxic waste burner. //Fusion Technology, vol.20, 1991), pp.683 ÷ 688.
- [3] Ю.М.Адо, Ю.А.Коровин, А.Г.Уфимцев. Электроядерная установка на основе накопителя дейтронов. // Труды 12 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. – М.: 1990 т.1, с.с.147 ÷ 153, препринт ИФВЭ 92-145, Протвино, 1992.
- [4] H.Grote, F.Ch.Iselin. The MAD Program, Version 8.4. (User's Reference Manual)//CERN/SL/90-13(AP).
- [5] Ю.М.Адо, А.Г.Уфимцев. Тепловой режим мишени интенсивного нейтронного генератора. (Доклад на данном совещании).
- [6] Б.Росси. Частицы больших энергий. – М.: Гостехиздат, 1955.
- [7] T.Meinander. - Generation of Magnetic Fields for Accelerator with Permanent Magnets. // CAS, CERN 94-01, vol.2, pp.983 ÷ 997.