

## ГЕНЕРАТОР ПРОТОНОВ

В. В. СУРЕНЯНЦ, И. Т. СИДОРОВ, А. Т. ДАВЫДОВ

Предложен генератор протонов (энергия протонов  $\sim 15$  Мэв), использующий реакцию  ${}^3\text{He} (D, P) {}^4\text{He}$ . В отличие от известных откачиваемых установок, работающих на основе реакции  $D ({}^3\text{He}, P) {}^4\text{He}$ , прибор отпаян. Описана методика фиксации  ${}^3\text{He}$  в мишени генератора. Расчетное число протонов при токе дейтронов  $10^{-6}$  к, энергии 170 кэв и  $t_{\text{имп}} = 10^{-6}$  сек составляет  $5 \cdot 10^4$  протонов/импульс. Полезная часть протонов, выведенных через специальное тонкостенное окно, составила  $0,5 \cdot 10^3$  протонов/импульс. Показано, что выход протонов может быть существенно увеличен путем увеличения ускоряющего напряжения.

Протонные генераторы, использующие реакцию  $D ({}^3\text{He}, P) {}^4\text{He}$ , описанные в [1 - 3] представляют собой откачиваемые системы, где в качестве мишени применяется дейтерид титана или циркония, а в качестве бомбардирующих частиц — ускоренные ионы  ${}^3\text{He}$ . Необходимость в откачке связана с тем, что некоторая доля инертного газа  ${}^3\text{He}$ , вводимого в систему во время работы источника, полностью не ионизируется и не внедряется в мишень, и не может удаляться из системы известными в настоящее время методами.

Отпаянный генератор протонов представляет собой вакуумную трубку, в которой осуществляется ядерная реакция  ${}^3\text{He}(D, P) {}^4\text{He}$  путем бомбардировки ускоренными ионами дейтерия гелиевой мишени, содержащей  ${}^3\text{He}$  в виде твердого раствора  $\text{He}$  в  $\text{Ti}$ . Гелиевая мишень может быть изготовлена путем насыщения  $\text{Ti}$  тритием до предельной концентрации, близкой к 66 ат.%, последующей выдержки в течение 10 месяцев и дальнейшего выделения трития из  $\text{Ti}$  путем нагрева до 400 - 500 °C при непрерывной откачке. Опыты показали, что при этом весь  ${}^3\text{He}$ , образовавшийся в результате распада трития, остается в  $\text{Ti}$ , а находящийся в титане тритий выделяется нацело. Согласно данным [4] предельная концентрация  ${}^3\text{He}$  в мишенях, изготовленных таким способом, может составить — 22 ат. %. Для уменьшения энергетических потерь излучаемых протонов гелиевая мишень изготавливается в виде усеченной полусферы, над отверстием которой располагается тонкостенное окно из нержавеющей стали. Небольшое количество  ${}^3\text{He}$ , выбиваемое ионной бомбардировкой из мишени, может периодически удаляться включением встроенного в трубку миниатюрного ионного насоса [5, 6].

Преимущества отпаянных генераторов

протонов по сравнению с откачиваемыми очевидны. Они имеют небольшие габариты, удобны в эксплуатации. Устройство отпаянного генератора протонов представлено на рис. 1. Схема питания трубки импульсная и представлена на рис. 2. При подаче импульса от генератора поджигающих импульсов на коммутирующий элемент  $\mathcal{L}$  происходит разряд емкостей  $C_1$  и  $C_2$  через первичные обмотки трансформаторов  $Tr1$  и  $Tr2$ . Во вторичной обмотке  $Tr1$  индуцируется ускоряющее напряжение, а во вторичной обмотке  $Tr2$  — напряжение поджига источника, инициирующее электрический разряд конденсатора  $C_3$  через вакуумный промежуток катод — анод источника. В этом промежутке образуются ионы дейтерия, которые ускоряются высоким напряжением в сторону мишени. Ускоренные ионы, попадая на гелиевую мишень, возбуждают ядерную реакцию  ${}^3\text{He} (D, P) {}^4\text{He}$  и образуют протоны с энергией — 15 Мэв. Протонная трубка может работать в режиме одиночных и многократных включений.

## РАСЧЕТ ВЫХОДА ПРОТОНОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Расчет ожидаемого выхода протонов из тонкой  $\text{Ti} + \text{He}$ -мишени сделан в предположении, что атомное соотношение  $\text{He}/\text{Ti}$  сохраняется постоянным по всей толщине мишени, а также, что толщина слоя поверхностных загрязнений пренебрежимо мала. Поскольку угловое распределение протонов при реакции  ${}^3\text{He} (D, P) {}^4\text{He}$  является изотропным по крайней мере до 800 кэв, то полный выход протонов на падающий дейтрон с энергией  $E$  выражается интегралом:

$$N(p) = \int_0^E \frac{n_t \sigma(E)}{dE/dx} dE, \quad (1)$$

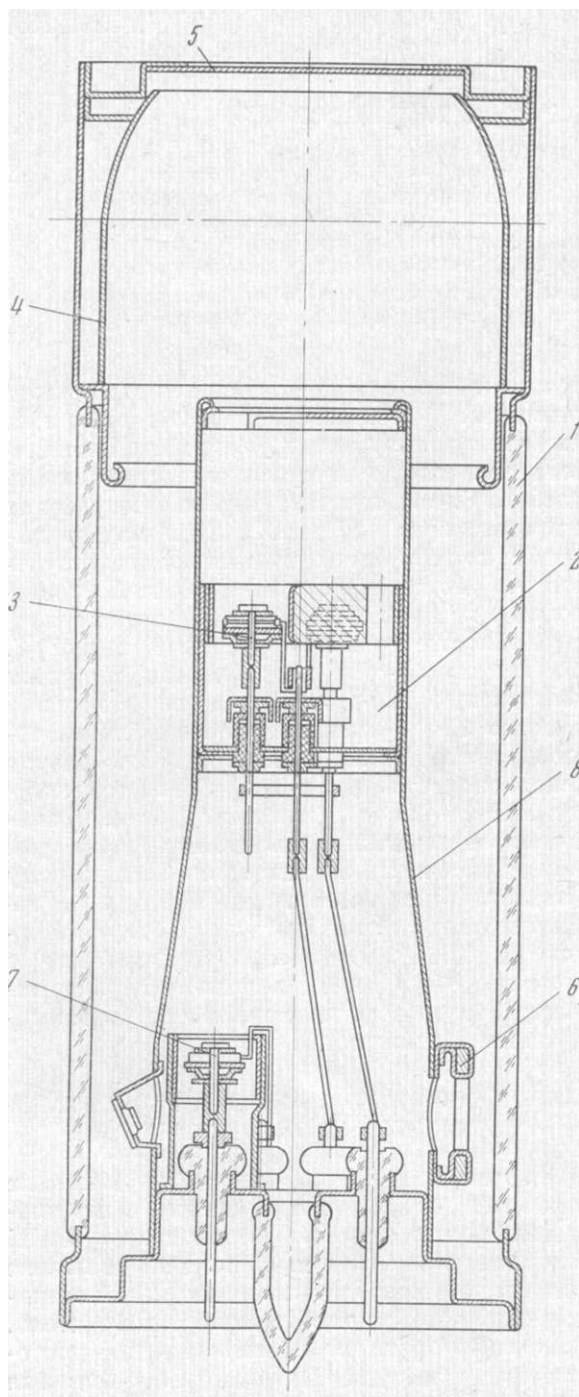


Рис. 1. Схема устройства отпаянного генератора протонов. 1 — металлостеклянная оболочка; 2 и 3 — инжектор ионов, представляющий собой несколько искровых ионных источников; 4 — гелиевая мишень; 5 — тонкостенное выводное окно; 6 — система газопоглотителей; 7 — искровой ионный насос; 8 — анодный электрод

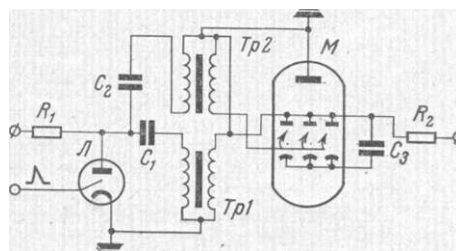


Рис. 2. Схема питания генератора протонов

где  $nI$  — число атомов  ${}^3\text{He}$  в  $1\text{ см}^3$  мишени, а  $[E]$  — полное эффективное сечение реакции  ${}^3\text{He}(D, P){}^4\text{He}$ ,  $dE/dx$  — ход энергетических потерь дейтрона с энергией  $E$  в мишени.

Для эффективного сечения  $\sigma[E]$  реакции  ${}^3\text{He}(D, P){}^4\text{He}$  использовались данные [1], согласно которым сечение реакции имеет резонансный ход с максимумом в области 640 кэв, равным 695 мбарн. При расчете выхода протонов по формуле (1) величины  $dE/dx$  и пробег дейтронов до 170 кэв заимствованы из [7]. Расчет показывает, что при бомбардировке  $\text{Ti}$  —  ${}^3\text{He}$  мишени с максимальным содержанием  ${}^3\text{He}$  22 ат.% дейтронным зарядом в 1 мкк с энергией 170 кэв, образуется  $5 \cdot 10^4$  протонов.

Описанный ионный источник дает 1 мкк дейтронного заряда за импульс. Ввиду того, что протоны имеют небольшую проникающую способность, большая часть их задерживается конструкционными материалами трубки (подложки мишени, баллона). Только та часть протонов, которая попадает на тонкостенное выводное окно, может быть использована. Расчет показывает, что эта часть протонов при данной конструкции трубки составляет не более 5 - 6% от их общего количества.

Протоны регистрировались при помощи фотоэмульсий. При этом фотопластинка стороной, на которую нанесена эмульсия, ставилась параллельно потоку протонов. Энергия и количество протонов измерялись по длине и количеству треков. Было облучено 10 пластин. Обследование проводилось на микроскопе МБИ-3. Количество протонов по результатам обсчета ядерных эмульсий оценивалось по формуле

$$N(p) = 4\pi N L^2 / t S_p, \quad (2)$$

где  $N$  — число треков,  $N(p)$ , протонов/сек — поток,  $t$ , сек — время облучения,  $L$  — рас-

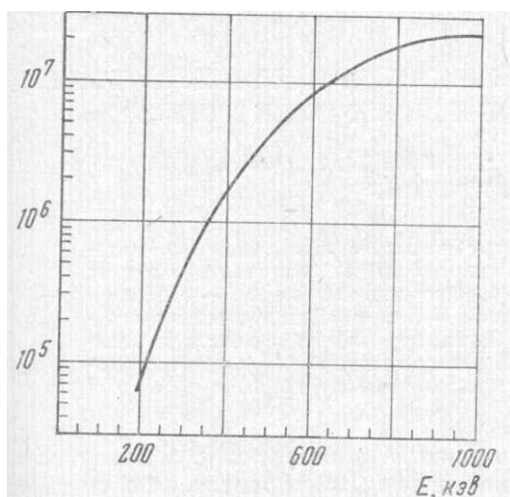


Рис. 3. Зависимость выхода протонов на 1 мкк дейтронного заряда от энергии дейтронов  $E$  для титаново-гелиевой мишени с атомным соотношением гелия к титану, равным 0,3, в области энергий до 1 Мэв

стояние от мишени до фотопластинки,  $S_n$  — проекция площади фотозмульсии, нормальная к потоку. Количество протонов, получаемых при единичном включении трубки, составило, 500 протонов/импульс.

Увеличить выход протонов можно путем увеличения энергии дейтронов и увеличения толщины гелиевой мишени. Значения  $dE/dx$  для энергии свыше 170 кэв в литературе отсутствуют. Поэтому вычисление пробега дейтрона в мишени проводилось лишь для Ti по приближенной формуле, заимствованной из [8].

$$R_{Ti} = 0,56 A^{1/3} R_{возд} \quad (3)$$

где  $R_{Ti}$ , мг/см<sup>2</sup> — пробег частицы в титане,  $A$  — атомный вес Ti,  $R_{возд}$  — пробег частицы в воздухе.

Согласно проведенному по формуле (3) расчету пробег дейтрона с энергией 1 Мэв в Ti составляет ~ 8 мк. Разобьем эту мишень на слои толщиной по 0,1 мк в предположении, что энергия дейтронов в пределах каждого слоя не изменяется, но при переходе к

соседнему слою меняется скачком. Принимая во внимание зависимость  $R = f(E)$ , можно из данных  $a = f(E)$  определить сечение реакции на расстоянии  $dx$  от поверхности для различных энергий. Общее количество протонов, выделяющихся в результате ядерной реакции на один падающий дейтрон соответствующей энергии, можно найти по формуле

$$N(p) = \int \sigma_i(E) dx_i, \quad (4)$$

где  $\sigma_i(E)$  — сечение реакции, соответствующее пробегу  $dx_i$ ,  $dx_i$  — глубина проникновения дейтрона в Ti + He-мишень при энергии  $E$  в предположении, что  $E$  в слое  $dx$ , не изменяется,  $n$  — концентрация  $^3\text{He}$  в мишени. Протонный выход на 1 мкк дейтронного заряда с энергией  $E$  для титаново-гелиевой мишени с атомным соотношением 0,3 представлен на рис. 3. Из рис. 3 видно, что для получения достаточно большого интегрального выхода протонов, например —  $10^7$ /импульс, необходимо ускоряющее напряжение — 850 кэв. Протонный выход за 1 сек при неизменном ускоряющем напряжении может быть увеличен путем увеличения частоты рабочих включений трубки.

Авторы приносят благодарность А. М. Родину за консультации и обсуждение материала, изложенного в статье.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. W. E. Kunzt, Phys. Rev., 1955, 7, № 7, 456.
2. Г. И. Кирьянов, А. М. Дадонов, К. И. Дереза, Тр. НИИ радиационной техники, 1971, вып. 6, 112, Атомиздат.
3. R. F. Seiler, M. R. Cleland, H. E. Wegner, Rev. Scient. Instrum., 1967, 38, 7, 114.
4. А. М. Родин, В. В. Суреняни, Ж. физ. химии, 1971, 45, 5, 1093.
5. А. П. Горшков, А. М. Родин, Л. К. Брунеллер, Ав. свид. № 151421, Бюл. ОИПОТЗ, 1963, № 22, 90.
6. Л. К. Брунеллер, А. П. Горшков, Н. Г. Павловская, В. А. Цукерман, ПТЭ, 1968, № 4, 156.
7. E. M. Gannersen, L. James, Nucl. Instrum., 1960, 8, 173.
8. Экспериментальная ядерная физика, 1956, т. 1, Изд-во иностр. лит.

Получено 26. VI. 1972