

## **ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОНОВ С АТОМНЫМ ПУЧКОМ**

*А.С.Белов, С.К.Есин, С.А.Кубалов,  
В.Е.Кузик, А.А.Степанов, В.П.Якушев*

Описан источник поляризованных протонов с током пучка в импульсе до 2,5 мА, степенью поляризации  $0,78 \pm 0,01$ , длительностью токового импульса 120 мкс и частотой следования 1 Гц. В источнике для получения поляризованных протонов впервые использована перезарядка поляризованных атомов водорода на ионах дейтериевой плазмы.

Для ускорения поляризованных протонов в импульсных ускорителях с большой скважностью инжектируемого пучка и проведения физических экспериментов с поляризованными протонами при высоких энергиях важной задачей является повышение интенсивности импульсных источников поляризованных протонов. В настоящее время среди источников поляризованных протонов непрерывного действия наибольшую интенсивность (свыше  $100 \text{ мкА}^{-1}$ ) имеют источники с атомным пучком, принцип действия которых основан на пространственном разделении тепловых атомов в разных состояниях сверхтонкой структуры в резконеоднородном магнитном поле и последующей ионизации поляризованных атомов (см., например, обзор <sup>2</sup>) В импульсных источниках такого типа были получены пучки поляризованных ионов с током до  $200 \text{ мкА}^{-3}$ .

В данной работе описан импульсный источник поляризованных протонов с током пучка до 2,5 мА. Источник показан схематически на рис. 1. Атомарный водород в источнике образуется в импульсном диссоциаторе 1 с высокочастотным (ВЧ) разрядом (см. <sup>4,5</sup>). При вытекании газа из диссоциатора через звуковое сопло  $\varnothing 2$  мм в вакуум, образуется сверхзвуковой поток атомарного водорода с наиболее вероятной скоростью частиц  $2 \cdot 10^5$  см/с, числом Маха более 4 и интенсивностью около  $2,8 \cdot 10^{20}$  ат/стер  $\cdot$  с. Атомарный пучок формируется с помощью скиммера  $\varnothing 5$  мм – 2 и коллиматора  $\varnothing 9$  мм – 3.

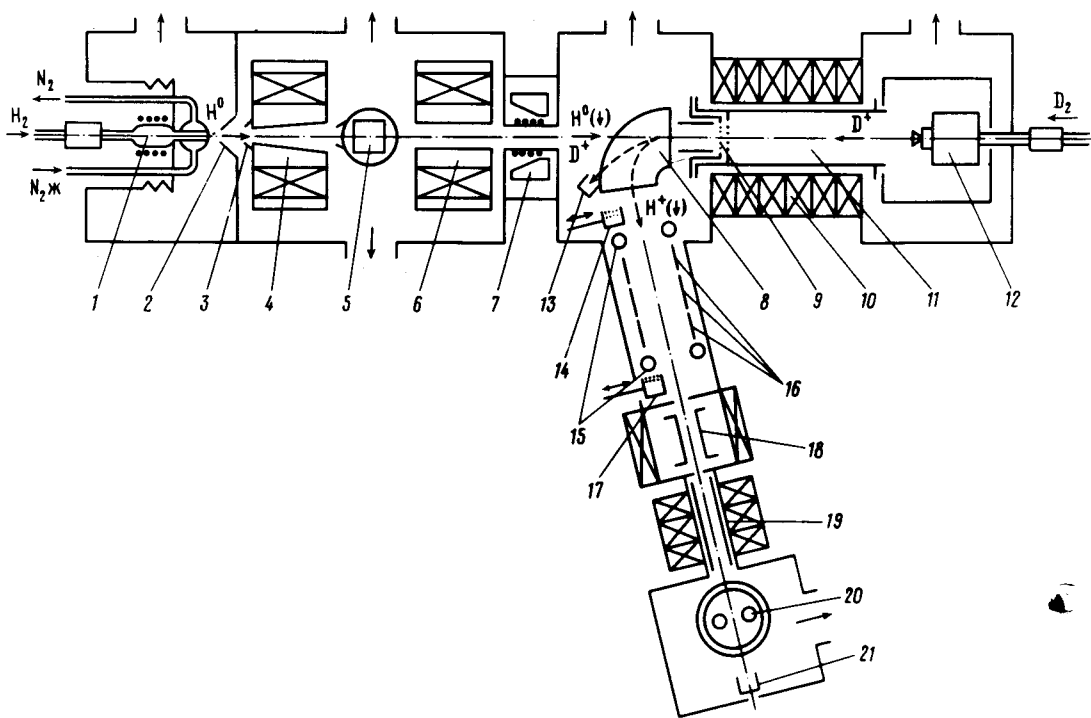


Рис. 1. Схема источника поляризованных протонов и поляриметра

Для получения пучка поляризованных атомов водорода использована комбинация из двух шестиполюсных магнитов 4 и 6 и блока ВЧ перехода в слабом поле 7. Как известно <sup>2</sup>, на выходе из такой системы поляризации после ВЧ перехода атомы находятся в состояниях сверхтонкой структуры с  $F = 1$ ,  $m_F = -1$  и  $F = 1$ ,  $m_F = 0$  и поляризация протонов в атомах (в сильном магнитном поле с  $B \gg 507$  Гс) близка к минус единице. Размеры магнитов были оптимизированы на основе проделанных расчетов траекторий движения атомов с измеренным распределением скорости. Расстояние между противоположными наконечниками полюсов в первом шестиполюсном магните увеличивается от 11 мм на входе до 27 мм на выходе магнита. Во втором магните апертура постоянна по длине магнита ( $L = 23$  см) и равна 31 мм. Магниты установлены на расстоянии 35 см друг от друга. Максимальная индукция магнитного поля на наконечниках полюсов магнитов равна 9 кГс. Времяпролетный масс-спектрометр 5 установлен для измерения компонентного состава и плотности водородного пучка.

Поляризованные протоны образуются в источнике при перезарядке поляризованных атомов на ионах дейтерия:  $H^0(\uparrow) + D^+ \rightarrow H^+(\uparrow) + D^0$ . В описываемом источнике поляризованных протонов, насколько нам известно, впервые используется перезарядка атомов водорода на ионах дейтериевой плазмы. Принципиальным преимуществом такого метода является высокая вероятность перезарядки атомов, что связано с большим сечением процесса перезарядки. При скорости относительного движения частиц  $\sim 2 \cdot 10^6$  см/с (энергия ионов дейтерия в плазме  $\sim 5$  эВ) сечение перезарядки равно  $\sim 4 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup>. Перезарядка происходит в магнитном поле около

1,2 кГс, которое создается секционированным соленоидом 10. В соленоид навстречу движению атомов импульсно инжектируется дейтериевая плазма, получаемая в дуговом источнике 12<sup>6</sup>. Плотность тока ионов дейтерия в плазменном шнуре в области перезарядки достигает 100 мА/см<sup>2</sup>. Образующиеся в области перезарядки 11 поляризованные протоны удерживаются в радиальном направлении магнитным полем соленоида и движутся, ускоряясь в слабых электрических полях в плазме, к системе ускоряющих электродов 9, в которой происходит одновременное ускорение ионов дейтерия и поляризованных протонов. В поворотном магните 8 происходит пространственное разделение пучков Н<sup>+</sup>(†) и D<sup>+</sup>. Ток ионных пучков измерялся цилиндрами Фарадея (ЦФ) 13, 14, 17 с подавлением вторичных электронов и апертурой Ø34 мм. На рис. 2 показано, как зависят ток пучка поляризованных протонов, измеренный ЦФ 17 на расстоянии 55 см от ускоряющих электродов, и ток дейтронного пучка (ЦФ 13) от энергии, до которой ускорялись ионы (плотность дейтериевой плазмы варьировалась для каждого значения ускоряющего напряжения для получения минимальной расходимости пучков). При энергии ионов 9,0 кэВ. получен пучок поляризованных протонов – 2,5 мА.

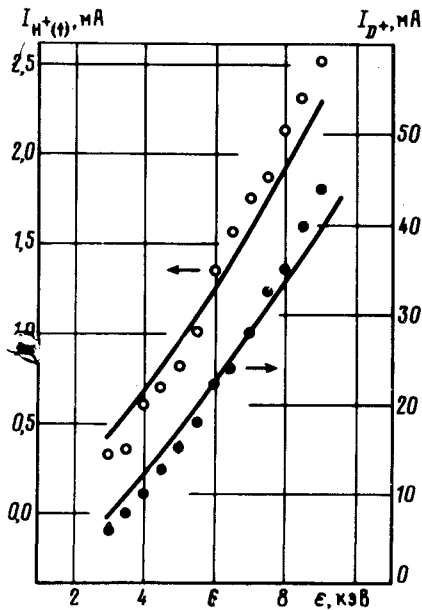


Рис. 2. Зависимость тока выведенных из источника пучков поляризованных протонов и ионов дейтерия от энергии ионов. Сплошная линия — аппроксимация результатов измерений зависимостью  $I \propto \epsilon^{3/2}$  ○ и ●: амплитудное значение импульсного тока ионов Н<sup>+</sup>(†) и D<sup>+</sup> соответственно

Поляризация пучка протонов измерялась поляриметром пучка низкой энергии<sup>7,8</sup>. Поляриметр состоит из натриевой газовой мишени 18, на которой поляризованные протоны перезаряжаются частично в метастабильные атомы водорода Н(2S<sub>1/2</sub>), спинового фильтра 19 для гашения β состояний Н(2S<sub>1/2</sub>), детектора метастабильных атомов 20 и включает также электростатическую линзу для фокусировки пучка 16, корректоры пучка 15 и ЦФ 21 для контроля прохождения пучка через поляриметр. Поляризация протонного пучка вычислялась через измеряемое отношение для потока метастабильных атомов в α состоянии с включенным ( $I_{\alpha_1}$ ) и выключенным ( $I_{\alpha_2}$ ) ВЧ переходом<sup>8</sup>:  $P = 2/[1 - x/(1 + x^2)^{1/2}] \times (I_{\alpha_1}/I_{\alpha_2} - 1)$ , где  $x = B/B_0$ ; B — индукция магнитного поля в области натриевой мишени (у нас B = 5,5 Гс), B<sub>0</sub> = 63,4 Гс — критическое поле для Н(2S<sub>1/2</sub>). При энергии пучка 9,0 кэВ и токе пучка 2,5 мА измеренное значение степени поляризации протонов равно 0,78 ± 0,01. В рассмотренном источнике приведенная интенсивность  $P^2I = 1,5$  мА, что более чем на порядок превышает достигнутое ранее значение  $P^2I$  в импульсных источниках такого типа ( $P^2I = 0,07$  мА<sup>3</sup>). Вероятно, интенсивность разработанного источника может быть увеличена в несколько раз, в частности, за счет повышения плотности плазмы в области перезарядки и соответствующего увеличения энергии протонов.

Авторы выражают благодарность В.М.Любашеву за ряд полезных дискуссий и постоянное внимание к работе.

## Литература

1. Mathews H.-G., Kruger A., Penselin S., Weinig A. Nucl. Instr. and Methods, 1983, 213, 155.
2. Плис Ю.А., Сороко Л.М. УФН, 1972, 107, 281.
3. Anishchenko N.G. et al. Proc. 5-th Int. Symp. on High Energy Spin Physics, Brookhaven, 1982 (AIP Proc. No 95, New York, 1983) p. 445; Schültz P.F. et al. Proc. 5-th Int. Symp. on Polarization Phenomena in Nuclear Physics, Santa Fe, 1980, (AIP Proc. No 69, New York, 1981) p. 909.
4. Belov A.S., Kubalov S.A., Kuzik V.E., Yakushev V.P. Nucl. Instr. and Methods, 1984, 227, 11.
5. Белов А.С., Кубалов С.А., Кузик В.Е., Якушев В.П. Письма в ЖТФ, 1984, 10, 999.
6. Димов Г.И., Росляков Г.В., ПТЭ, 1974, 1, 29.
7. Clausnitzer G., Fick D. Nucl. Instr. and Methods, 1976, 47, 171.
8. Плис Ю.А., Сороко Л.М. ОИЯИ, Д 9-9472, Дубна, 1976.

Институт ядерных исследований  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
9 июля 1985 г.