

С 3454  
Д-678

241/2-71

1/11-71

Р9 - 5446

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

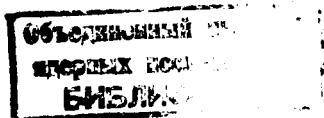
Е.Д. Донец, Ю.А. Плис

СПОСОБ  
ПОЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ПУЧКА  
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ИОНОВ ДЛЯ ИНЖЕКЦИИ  
В УСКОРИТЕЛИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

**P9 - 5446**

**Е.Д. Донец, В.А. Плис**

**СПОСОБ  
ПОЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ПУЧКА  
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ИОНОВ ДЛЯ ИНЖЕКЦИИ  
В УСКОРИТЕЛИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**



Известные источники поляризованных протонов или дейтронов, работающие по принципу пространственного разделения атомов в неоднородном магнитном поле с последующей ионизацией, могут дать ток поляризованных ионов максимум 5 – 15 мка<sup>1,2/</sup>. Эти источники успешно работают на циклотронах и линейных ускорителях<sup>3/</sup>, обеспечивая пучок ускоренных поляризованных частиц с интенсивностью, намного превосходящей ту, которую можно получить рассеянием на мишени. Для ускорителей высоких энергий помимо того, что имеются известные трудности с сохранением поляризации при ускорении<sup>4/</sup>, возможная интенсивность ускоренного пучка поляризованных частиц оказывается слишком низкой (по оценкам, сделанным<sup>5/</sup> для Брукхэвенского синхротрона на 30 Гэв, при инжектируемом токе 5 мка ожидается  $\approx 6 \cdot 10^8$  поляризованных протонов в импульсе). Существенного увеличения интенсивности можно ожидать, если накопить поляризованные ионы за время между импульсами и инжектировать их в течение времени захвата ускорителя.

Недавно был предложен принцип создания ионизатора с накоплением ионов в квадрупольной электростатической ловушке<sup>6/</sup>. Приведенные расчеты показывают, что в системе можно накопить до  $10^9$  ионов, т.е. при вытягивании их за 10 мксек получить ток около 10 мка.

В настоящей работе предлагается способ накопления поляризованных ионов в электронном пучке, движущемся в сильном продольном магнитном поле внутри секционированной дрейфовой трубки<sup>7,8/</sup>. Возможная схема ионизатора представлена на рисунке.

Электронный пучок, вытянутый из кольцевого катода, попадая в более сильное магнитное поле, сжимается в цилиндрический пучок, ионизирует атомный пучок, движущийся соосно с ним внутри дрейфовой трубки,

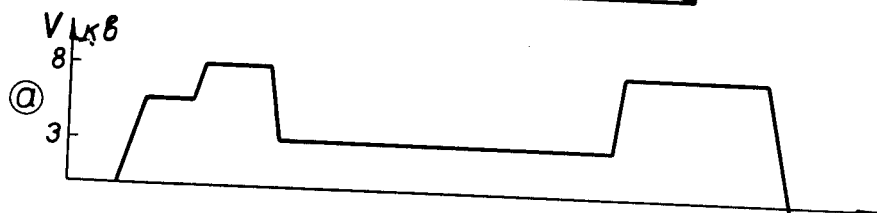
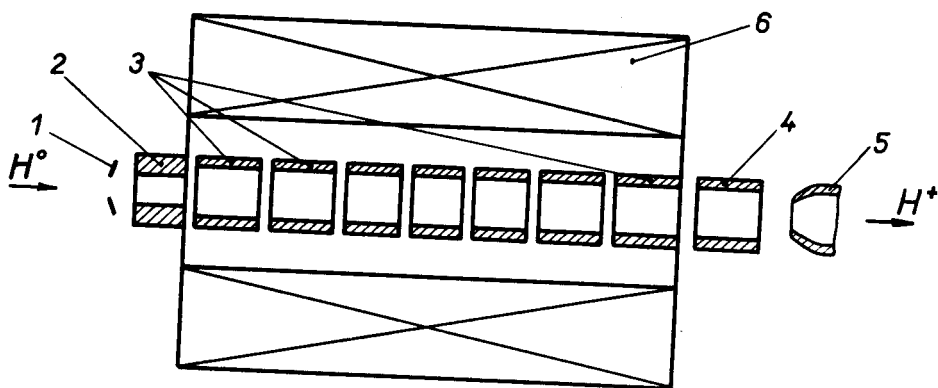


Схема ионизатора с накоплением поляризованных ионов: 1 - кольцевой катод, 2 - анод, 3 - дрейфовая трубка, 4 - коллектор электронов, 5 - вытягивающий электрод, 6 - соленоид; а - распределение потенциалов в ходе накопления ионов, б - распределение потенциала при вытягивании ионов.

и попадает на коллектор электронов. Ионы накапливаются в объеме дрейфовой трубки, ограниченном двумя электродами с более высокими потенциалами, чем потенциал остальных электродов. В радиальном направлении ионы удерживаются электрическим полем, созданным зарядом электронного пучка. Распределение потенциала вдоль радиуса трубки имеет параболическую форму, т.е. образуется "потенциальная яма". Ионы совершают радиальные колебания с амплитудой, определяемой местом ионизации. Если при накоплении ионов электронный объемный заряд поддерживать постоянным, то глубина радиальной "потенциальной ямы" будет уменьшаться со временем, что приведет к увеличению радиальных колебаний ионов и потере ионов на электродах. Поэтому необходимо повышать плотность электронов, например путем увеличения электронного тока. Это достигается повышением потенциала анода по закону, определяемому скоростью ионизации атомного пучка. На рисунке (а) показано распределение потенциала электродов в режиме накопления. Для определенности принято, что ионы накапливаются при потенциале 3 кв, а потенциал оконечных электродов дрейфовой трубки равняется 8 кв. Для быстрого вытягивания ионов импульсно создается градиент потенциала вдоль дрейфовой трубки - см. рисунок (б).

Оценим максимальное число ионов  $N_1^m$ , которое можно накопить в ионизаторе. Очевидно, что

$$N_1^m = N_0^m - N_q, \quad (1)$$

где  $N_0^m$  - максимальное число электронов, находящихся в области накопления,  $N_q$  - число электронов, необходимое для создания радиального падения потенциала  $\Delta U$ , равного, скажем, 100 в. Величина  $N_q$  находится из соотношения

$$N_q = 7.10^6 \Delta U \ell, \quad (2)$$

где  $\ell$  - длина области накопления, измеряемая в см.

Максимальное число электронов  $N_0^m$  определяется электронным током  $I_0^m$  и потенциалом области накопления:

$$N_e^m = 1,05 \cdot 10^{11} \frac{I_e^m \ell}{\sqrt{U}}, \quad (3)$$

где  $I_e^m$  - максимальный электронный ток, который может быть пропущен через трубку с потенциалом  $U$ , полностью заполняя сечение трубки/9/,

$$I_e^m = 32,4 \cdot 10^{-6} U^{3/2}. \quad (4)$$

Например, при  $U = 3$  кв  $I_e^m = 5,3$  а, и из соотношения (1)  $N_i^m = 9,3 \cdot 10^9 \ell$ .

Режим накопления должен начинаться с тока  $I_e^0$ , который для электронного пучка без ионов создает яму глубиной  $\Delta U = 100$  в:

$$I_e^0 = 6,6 \cdot 10^{-5} \sqrt{U \Delta U}, \quad (5)$$

откуда при  $U = 3$  кв и  $\Delta U = 100$  в получается  $I_e^0 = 0,36$  а.

Исходя из условия постоянства  $U$  и  $\Delta U$  в ходе накопления, можно найти зависимость электронного тока от времени:

$$I_e(t) = I_e^0 \exp \left[ 9,5 \cdot 10^{-12} \frac{N_{ат} \sigma(U) \sqrt{U}}{\pi a^2 \ell e} t \right], \quad (6)$$

где  $N_{ат}$  - число поляризованных атомов, находящихся в области накопления,  $a$  - радиус дрейфовой трубки в см,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  к - заряд электрона,  $\sigma(U)$  - сечение ионизации. Время накопления - это время повышения электронного тока от  $I_e^0$  до  $I_e^m$ :

$$t_n = 1,05 \cdot 10^{11} \frac{\pi a^2 \ell e}{N_{ат} \sigma(U) \sqrt{U}} \ln \frac{I_e^m}{I_e^0}. \quad (7)$$

Зависимость сечения ионизации атомов водорода или дейтерия от энергии при  $U > 100$  в хорошо аппроксимируется соотношением /10/

$$\sigma(U) = \frac{3,15 \cdot 10^{-15}}{U} \log \frac{U}{0,325} \quad (8)$$

При инжекции атомов необходимо выполнить условие, чтобы атомы не попадали на электроды внутри ионизатора, т.е. атомный пучок должен быть коллимирован. Полагая угол расходимости атомного пучка равным  $\alpha$  и плотность атомов на входе в ионизатор —  $\rho_0$ , получим для времени накопления соотношение

$$t_H = 1,23 \cdot 10^7 \frac{\sqrt{U}}{\rho_0 \left(1 - \alpha \frac{\ell}{a}\right)^2} \frac{\log \frac{U}{204}}{\log \frac{U}{0,325}} \quad (9)$$

При  $\ell = 20$  см,  $a = 0,5$  см,  $\rho_0 = 3 \cdot 10^{11}$  ат/см<sup>3</sup>,  $\alpha = 10^{-2}$  и  $U = 3$  кв находим  $t_H = 1,8 \cdot 10^{-3}$  сек.

Если потребуется сократить время накопления, то можно начинать накопление с потенциала  $U$ , меньшего 3 кв, когда сечение ионизации имеет большую величину, постепенно повышая потенциал до 3 кв. Например, при начальных условиях  $U = 1$  кв,  $I_0 = 0,21$  а получится время накопления  $t_H \approx 10^{-3}$  сек, т.е. почти в 2 раза меньше, чем при постоянном  $U = 3$  кв.

В принципе, если длительность времени накопления не имеет существенного значения, возможна схема инжекции атомного пучка поперек электронного. Дрейфовая трубка в той части, где ее пересекает атомный пучок, должна быть сетчатой.

Используя ионизатор этого типа, можно создать источник поляризованных протонов на основе ионизации пучка молекул водорода с поляризованными ядрами. Первоначально образуются молекулярные ионы  $H_2^+$ , которые будут удерживаться в ловушке, так что при вторичной ионизации получают протоны. Источник поляризованных ионов в этом случае несколько упрощается, так как не требуется диссоциировать молекулы на атомы.

Все приведенные оценки сделаны без учёта наличия остаточного газа, который также ионизуется и накапливается в ловушке. Так как полное число накопленных ионов постоянно, то следствием ионизации остаточного газа, помимо "разбавления" поляризации, является снижение интенсивности. Поэтому требования на вакуум достаточно жесткие. При аксиальной инжекции вакуум внутри дрейфовой трубки должен быть по крайней мере на 2 порядка лучше, чем давление в атомном пучке ( $\approx 10^{-6}$  тор), и составлять  $\approx 10^{-8}$  тор. В случае использования поперечной инжекции требуется еще более высокий вакуум.

Проблема сохранения поляризации ионов при накоплении, по-видимому, не представляет трудностей, так как для нерелятивистских электронов кулоновские столкновения электронов с ионами не влияют на поляризацию<sup>/11/</sup>. При нейтрализации поляризованных ионов на атомах пучка образуются поляризованный ион и быстрый атом, который при попадании на электрод деполаризуется и при последующей ионизации приведет к уменьшению поляризации ионов. Детальный учёт деполаризационных эффектов здесь не проводится.

Сделаем оценку тока поляризованных протонов для проектируемого в Лаборатории ядерных проблем фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля<sup>/12/</sup>. По проекту при частоте повторения 600 гц интервал времени между импульсами составляет  $1,6 \cdot 10^{-3}$  сек и время захвата ионов равняется 40-50 мксек. Если за это время вытянуть из ионизатора все накопленные ионы ( $1,8 \cdot 10^{11}$  при длине  $l = 20$  см), то импульсный ток инжекции составит 800 мка ( $5 \cdot 10^{15}$  сек<sup>-1</sup>). Приняв эффективность аксиальной инжекции равной 10% и коэффициент фазового захвата 1/3, получим средний ток внутри фазотрона равным  $4 \cdot 10^{12}$  сек<sup>-1</sup>, а выведенный ток поляризованных протонов - равным  $2,8 \cdot 10^{12}$  сек<sup>-1</sup> (0,5 мка), что в 400 раз превышает проектное значение потока поляризованных протонов, которые можно получить рассеянием на мишени.

Реализация импульсного ионизатора сделает практичным ускорение первичнополяризованных частиц до высоких энергий на синхрофазотронах. Можно ожидать<sup>/13/</sup>, что проблемы сохранения поляризации в жесткофокусирующих ускорителях гораздо менее сложны, чем представлялось рань-

ше<sup>/4,5/</sup>. Например, для модели кибернетического ускорителя<sup>/14/</sup> Радиотехнического института АН СССР на 1 Гэв деполаризация оказывается пренебрежимо малой, и при инжекции накопленных ионов за время захвата ток поляризованных протонов имел бы такую же величину, как и ток неполяризованных. Для синхрофазотрона ОИЯИ пока можно утверждать, что при ускорении сохраняется поляризация дейтронов<sup>/15/</sup>. Посредством стриппинга можно будет получить поляризованные нейтроны с энергией несколько Гэв.

В заключение авторы выражают благодарность за многочисленные замечания В.А. Альперту, В.И. Илющенко, Д.Л. Новикову и Л.М. Сороко.

#### Л и т е р а т у р а

1. *Proceed. Int. Conf. on Polarized Targ. and Ion Sources, Saclay, France, 1966, p. 177.*
2. H.F. Glavish. *Nucl. Instr. and Meth.*, 65, 1 (1968).
3. W. Haerberli. *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, 17, 373 (1967).
4. П.Р. Зенкевич. Труды 4-ой международной конференции по ускорителям. Атомиздат, 1964, стр. 919.
5. V.W. Hughes. *Proc. 5-th Int. Conf. on High Energy Accel., Roma, 1966, p. 537.*
6. P. Coiffet. *Comp. Rend. Acad. Sci.*, 270B, 343 (1970).
7. Е.Д. Донец, В.И. Илющенко, В.А. Альперт. Препринт ОИЯИ. Р7-4124, Дубна, 1968.
8. Е.Д. Донец, В.И. Илющенко, В.А. Альперт. Сообщения ОИЯИ, Р7-4469, Дубна, 1969.
9. Д.Р. Пирс. Теория и расчёт электронных пучков, М., 1956.
10. Д. Браун и др. В сб. "Поляризация нуклонов", М., 1962, стр. 67.
11. В.В. Хьюз и др. В сб. "Поляризация нуклонов", М., 1962, стр. 80.
12. А.А. Глазов и др. Атомная энергия, 27, 16 (1969).
13. V. Ernst. *Nucl. Instr. and Meth.*, 60, 52 (1968).
14. Г.И. Бацких и др. Труды 4-ой международной конференции по ускорителям. Атомиздат, 1964, стр. 217.
15. Ю.А. Плис, Л.М. Сороко. Препринт ОИЯИ, 9-5012, Дубна, 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел