

- [1] *Hantzsche E.* // Contrib. Plasma Phys. 1987. Vol. 27. N 4. P. 293—308.
- [2] *Зекцер М. П., Раховский В. Н.* // ДАН СССР. 1984. Т. 278. № 1. С. 86—89.
- [3] *Hantzsche E.* // Contrib. Plasma Phys. 1983. Vol. 23. N 1. P. 77.
- [4] *Bingeliene D., Domarkas V., Pranevičius L., Ragauskas A.* // Proc. XI Intern Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Berlin, 1984. P. 89—91.
- [5] *Бингялене Д.-Ю. Й., Рагаускас А. В., Пранявичюс Л. Й.* А. с. 1213506. Б. И. 1986. № 7.
- [6] *Бутейкис Р. Ю., Белазарас А. В., Обераускас И. С., Серапинас П. Д.* // Лит. физ. сб. 1987. Т. 27. № 3. С. 366—368.
- [7] *Пучкарев В. Ф., Проскуровский Д. Н., Мурзакис А. М.* // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 12. С. 2324—2330.
- [8] *Аверьянов И. Е., Балькин Ю. А., Мартюжина Л. И.* и др. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 11. С. 2142—2146.
- [9] *Раховский В. Н.* Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. М.: Наука, 1970. 536 с.
- [10] *Габович М. Д., Порицкий В. Я.* // ЖЭТФ. 1983. Т. 85. Вып. 1 (7). С. 146—154.
- [11] *Меримевский Л. Л., Титов В. М.* // ДАН СССР. 1986. Т. 286. № 1. С. 109—112.
- [12] *Антанавичюс Р. Л., Серапинас П. Д., Шимжус П. П.* // Опт. и спектр. 1987. Т. 63. Вып. 1. С. 224—225.

Каунасский  
политехнический институт  
им. Антанаса Снечкуса

Поступило в Редакцию  
30 июня 1988 г.  
В окончательной редакции  
12 декабря 1988 г.

02; 12  
©1990 г.

Журнал технической физики, т. 60, в. 2, 1990

## МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА

А. С. Белов, В. Е. Кузик, В. П. Якушев

Использование метода перезарядной инжекции поляризованных пучков в ускорителях высоких энергий позволяет значительно повысить интенсивность ускоренных поляризованных пучков. Поэтому разработке источников отрицательных поляризованных ионов водорода ( $\text{H}^-$ ) уделяется в последнее время значительное внимание.

В источниках поляризованных протонов, работающих по методу атомарного пучка, двойной перезарядкой поляризованных протонов на натриевой мишени в сильном магнитном поле получены пучки ионов  $\text{H}^-$  с током 25 мкА [1]. В источниках ионов  $\text{H}^-$  с ионизацией атомов водорода пучком быстрых атомов цезия получен пучок ионов  $\text{H}^-$  с током 30—40 мкА [2]. В лазерных источниках поляризованных ионов водорода интенсивность пучка ионов  $\text{H}^-$  достигает 250 мкА [3]. Одним из перспективных, но до сих пор не реализованных методов получения ионов  $\text{H}^-$  является метод перезарядки поляризованных атомов водорода на отрицательных ионах дейтерия [4]  $\text{H}^0 + \text{D}^- \rightarrow \text{H}^- + \text{D}^0$ . Этот процесс имеет большое сечение при низкой энергии относительного движения взаимодействующих частиц ( $\sigma \sim 7 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$  при  $\epsilon_{\text{отн}} \sim 10^2 \text{ эВ}$ ). Предложена и проводится экспериментальная проверка такого метода [2, 5] с использованием поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов дейтерия типа кольцевого магнетрона.

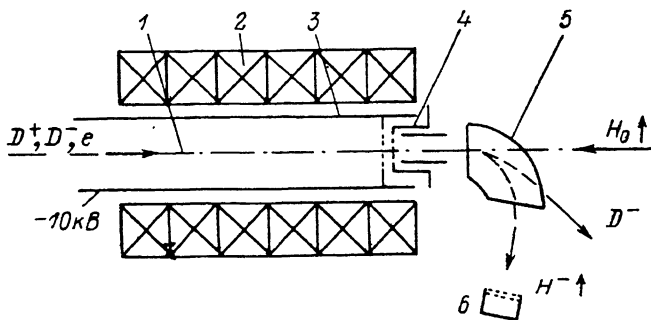
В работе [6] для получения ионов  $\text{H}^-$  было предложено использовать перезарядку поляризованных атомов водорода на ионах  $\text{D}^-$ , содержащихся в струе дейтериевой плазмы, которая инжектируется в область перезарядки с магнитным полем около 1 кГс из источника дейтериевой плазмы. Аналогичный метод был использован ранее для получения импульсного пучка поляризованных протонов с пиковым током до 10 мА [6, 7].

В данной работе приводятся результаты экспериментальной проверки метода. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке. Пучки поляризованных атомов водорода и дейтериевой плазмы инжектируются навстречу друг другу и пересекаются в области перезарядки 1 в магнитном поле 1.3 кГс, создаваемом соленоидом 2. Область перезарядки экранировалась от внешних электрических полей экраном 3, на который подавалось импульсное ускоряющее напряжение 10 кВ. Возникающие в результате реакции перезарядки ионы  $\text{H}^-$

движутся к ионно-оптической системе 4 и ускоряются вместе с электронами плазмы и ионами  $D^-$  до энергии 10 кэВ. Ускоренные пучки разделяются по массам в поворотном магните 5 и регистрируются цилиндрами Фарадея 6. Детально экспериментальная аппаратура описана в работе [6].

Для получения дейтериевой плазмы с высокой плотностью ионов  $D^-$  наиболее перспективным является использование поверхностно-плазменных источников [8]. В данной работе для проверки метода использовался дуговой источник дейтериевой плазмы [6], в котором генерируется плазма с низкой плотностью ионов  $D^-$ . Из проведенных измерений было определено, что отношение плотности ионов  $D^-$  к плотности ионов  $D^+$  в плазме, генерируемой источником при токе разряда около 50 А, равно  $3 \cdot 10^{-4}$ .

В экспериментах наблюдалось линейное увеличение тока ионов с ростом тока дугового разряда в источнике плазмы при изменении тока разряда в диапазоне 30—80 А. Для тока ионов  $H^-$  наблюдалось насыщение роста тока пучка, вытягиваемого из области перезарядки, при увеличении плотности плазмы. При токе разряда в источнике плазмы 40 А был получен



пучок отрицательных поляризованных ионов водорода с импульсным током 0.2 мкА, соответствующий ток пучка ионов  $D^-$  был равен 3 мкА. Длительность импульсов ионного тока определялась длительностью импульса тока разряда в источнике плазмы и была равна 120 мкс, частота следования импульсов 1 Гц. В данном источнике поток атомов водорода равен  $10^{17} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  [6], отсюда эффективность перезарядки атомов в ионы  $H^- \sim 10^{-5}$ .

Аксиальная скорость ионов  $H^-$ , образующихся при перезарядке на ионах  $D^-$ , определяется слабыми электрическими полями в плазме и может быть сравнима со скоростью атомов, инжектируемых в область перезарядки ( $2 \cdot 10^5 \text{ см/с}$ ). Поэтому при увеличении плотности плазмы становится существенным разрушение ионов  $H^-$  электронами плазмы и ионами  $D^+$ . Процессы разрушения ионов  $H^-$  на молекулах остаточного газа и атомах водорода можно не учитывать из-за относительно высокого вакуума в области перезарядки ( $\sim 10^{-5} - 10^{-6} \text{ Тор}$ ) и низкой плотности атомов водорода в атомарном пучке ( $10^{12} \text{ см}^{-3}$ ).

При таких предположениях для тока пучка ионов  $H^-$ , извлекаемого из области перезарядки, нетрудно получить выражение, аналогичное приведенному в работе [6] для пучка поляризованных протонов,

$$I_{H^-} = eK \langle \sigma_1 v_{D^-} \rangle \int_V W n_{D^-} n_{H^0} dV, \quad (1)$$

$$W = W_0 \exp [ - (n_e \langle \sigma_2 v_e \rangle + n_+ \langle \sigma_3 v_+ \rangle) z / \langle v_{H^-} \rangle ], \quad (2)$$

где  $n_{H^0}$  — плотность пучка поляризованных атомов водорода в области перезарядки;  $V$  — объем области пересечения пучков атомов и плазмы;  $n_{D^-}$ ,  $v_{D^-}$ ,  $n_+$ ,  $v_+$ ,  $n_e$ ,  $v_e$  — плотность и скорость ионов  $D^-$  и  $D^+$  в плазме и электронов соответственно;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  — сечения процессов перезарядки и разрушения ионов  $H^-$  при столкновении с электронами и ионами  $D^+$  плазмы соответственно;  $v_{H^-}$  — скорость ионов  $H^-$ ;  $e$  — заряд электрона;  $z$  — расстояние от места возникновения иона  $H^-$  до ионно-оптической системы;  $K$  — множитель, учитывающий потери при транспортировке пучка от ионно-оптической системы до места регистрации;  $W$  — вероятность вытягивания иона  $H^-$  из области перезарядки; угловые скобки означают усреднение фактора в скобках по распределению скорости частиц в плазме.

Экспоненциальный множитель в формуле (2) учитывает разрушение ионов  $H^-$  электронами плазмы и рекомбинацию на ионах  $D^+$ .

Из формул (1), (2), учитывая квазинейтральность плазмы, предполагая однородное распределение атомов водорода и ионов  $D^-$  в объеме перезарядки, нетрудно получить, что при

увеличении плотности плазмы ток пучка ионов  $\text{H}^-$  достигает значения тока насыщения, которое можно оценить по следующей формуле:

$$I_{\text{H}^-}^{\text{с}} = eKW_0 n_{\text{D}^-} / n_+ \{ \langle \sigma_1 v_{\text{D}^-} \rangle / (\langle \sigma_2 v_e \rangle + \langle \sigma_3 v_+ \rangle) \} n_{\text{H}^-} \langle v_{\text{H}^-} \rangle S, \quad (3)$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения объема перезарядки, из которого извлекаются ионы  $\text{H}^-$ ; у нас  $S=1 \text{ см}^2$ .

Температура электронов плазмы, генерируемой данным источником,  $T_e \approx 2 \text{ эВ}$ , температура ионов  $T_i \approx 5 \text{ эВ}$  [9].

Пользуясь данными о сечениях процессов [8], имеем  $\langle \sigma_1 v_{\text{D}^-} \rangle \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$ ,  $\langle \sigma_2 v_e \rangle \approx 1.5 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$ ,  $\langle \sigma_3 v_+ \rangle \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$ . По результатам данной работы  $n_{\text{D}^-} / n_+ = 3 \cdot 10^{-4}$ , по данным работы [6]  $n_{\text{H}^-} = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $KW_0 \sim 0.1$ . Полагая для оценки  $\langle v_{\text{H}^-} \rangle = 5 \cdot 10^5 \text{ см/с}$ , из формулы (3) получаем  $I_{\text{H}^-}^{\text{с}} = 0.25 \text{ мкА}$ , что хорошо согласуется с экспериментальным результатом.

Из проведенных измерений и анализа метода следует, что возможность получения интенсивного пучка ионов  $\text{H}^-$  по данному методу решающим образом зависит от параметров плазменной дейтериевой мишени. При относительной плотности ионов  $\text{D}^-$  в плазме  $n_{\text{D}^-} / n_+ \sim 0.1$ , температуре электронов  $T_e \sim 1 \text{ эВ}$ , температуре ионов  $T_i \sim 10^2 \text{ эВ}$  (характерной для поверхностно-плазменных источников) и поперечной площади объема перезарядки  $S=2 \text{ см}^2$ , как следует из формулы (3), можно рассчитывать получить рассматриваемым методом пучок ионов  $\text{H}^-$  с током  $\sim 500 \text{ мкА}$ . К достоинствам метода следует также отнести отсутствие в источнике мишени из паров щелочных металлов, наличие которых в других методах ограничивает время непрерывной работы источников и усложняет их эксплуатацию.

В заключение авторы выражают благодарность С. К. Есину за внимание к работе.

#### Список литературы

- [1] Gräßler W., Schmelzbach P. A., Singy D., Zhang W. Z. // *Helv. Phys. Acta*. 1986. Vol. 59. N 4. P. 568—572.
- [2] Alessi J. G., Krouou A., Sluyters Th. // *Helv. Phys. Acta*. 1986. Vol. 59. N 4. P. 563—567.
- [3] Zelenskii A. V., Kohanovskii S. A., Polushkin V. G., Vishnevskii K. N. // *Proc. 7<sup>th</sup> Intern. Symp. on High Energy Spin Physics*. Protvino (USSR), 1987. Vol. 1. P. 154—166.
- [4] Haeblerli W. // *Nucl. Instr. Meth.* 1968. Vol. 62. N 3. P. 355—357.
- [5] Alessi J. G., Sluyters Th., Hershcovitch A. // *AIP Conf. Proc. «Polarized Proton Ion Sources»*. Vancouver: TRIUMF, 1984. N 117. P. 32—35.
- [6] Белов А. С., Есин С. К., Кубалов С. А. и др. // *Препринт ИЯИ АН СССР*. М., 1986. № П-0458. 26 с.
- [7] Belov A. S., Yessin S. K., Kubalov S. A. et al. // *Proc. 7<sup>th</sup> Intern. Symp. on High Energy Spin Physics*. Protvino (USSR), 1987. Vol. 2. P. 171—174.
- [8] Бельченко Ю. П., Димов Г. И., Дудников В. Г. // *Препринт ИЯФ СО АН СССР*. Новосибирск, 1977. № 77-56. 43 с.
- [9] Росляков Г. В. // *ПТЭ*. 1981. № 2. С. 167—169.

Институт ядерных исследований АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
5 июля 1988 г.

## ПЛАНАРНЫЕ ВОЛНОВОДЫ, ФОРМИРУЕМЫЕ ДЕЙСТВИЕМ СВЕТА НА СЛОЯХ ХАЛЬКОГЕНИДОВ МЫШЬЯКА

И. И. Туряница, М. И. Марьян, В. В. Химинец

В связи с потребностями различных областей интегральной оптики в создании новых материалов для световодов широкого диапазона работы в настоящее время большое внимание уделяется технологии получения и исследованию характеристик тонкопленочных волноводов на основе халькогенидных стеллообразных полупроводников (ХСП). Повышенный интерес к указанным материалам вызван как достаточно простой технологией их изготовления, так и возможностью реверсивного изменения их свойств под действием внешних факторов, в частности освещения [1, 2].