

С 345Н

П-389

Плис Ю.а.

Б2-9-82-179

2038/82



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б2-9-82-179

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1982

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ УСКОРЕННЫХ ПУЧКОВ  
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОНОВ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

А  
Ю.А.Плис

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Б 2 - 9 - 82 - 179

Аннотация

Сообщается о результатах разработки источника поляризованных протонов для фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля и источника поляризованных дейтронов ("Полярис") для синхрофазотрона ОИЯИ. Обсуждаются перспективы увеличения интенсивности поляризованных пучков.

I. Введение

Общим для всех источников поляризованных ионов (ИПИ) является получение пучков нейтральных атомов, поляризованных по спину электрона. Поляризация может быть передана от электронов к ядрам (протонам или дейтронам) различными способами. Это - индуцирование ВЧ (СВЧ)-переходов между уровнями сверхтонкой структуры или неадиабатическое прохождение быстрыми атомами области реверса магнитного поля (метод Сола). Затем, отбирая или добавляя электрон к атому водорода, формируют пучки положительных или отрицательных поляризованных ионов. Отрицательные ионы представляют особый интерес для синхротронов, поскольку позволяют осуществить многооборотную инжекцию с существенным увеличением интенсивности ускоренного пучка. Подробный обзор по источникам отрицательных поляризованных ионов был сделан Хеберли /1/. В данной работе рассматрива-

ются методы получения положительных поляризованных ионов с учетом достижений последних лет. Учитывая наличие ряда обзоров, например /1-4/, опущено детальное рассмотрение основных принципов работы ИПИ.

## 2. Метод атомного пучка

Получение поляризованных протонов или дейтронов в этом случае включает следующие основные этапы: диссоциация молекул водорода в ВЧ (СВЧ) разряде, формирование с помощью системы диафрагм атомного пучка, пространственное разделение атомов в неоднородном магнитном поле, индуцирование ВЧ (СВЧ)-переходов и ионизация. Ниже рассмотрены примеры двух типов ИПИ - непрерывного и импульсного источников.

### 2.1. ИПИ Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ

В ЛЯП ОИЯИ в течение ряда лет проводились исследования на стенде источника поляризованных протонов /5/, предназначенного для фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля. ИПИ характеризуется следующими параметрами.

Рабочая частота автогенератора диссоциатора составляет 150 МГц. Мощность в разряд поступает через спиральный резонатор /6,7/. Разрядная колба охлаждается сжатым воздухом, а участок перед эффузором - водой с помощью герметизированной ванны. Сопло из пирекса могло охлаждаться жидким азотом посредством спиральной медной пружины, охватывающей оконечную часть разрядной трубки, до температуры около 200 К. В экспериментах были испытаны два типа эффузоров: один - в виде короткого сопла с диаметром горловины 2,5 мм, другой - в виде канала длиной 7 мм и диаметром 2,5 мм. При равных

расходах водорода достигаются одинаковые потоки поляризованных атомов с каждым из эффузоров. Скиммер диаметром 3 мм располагается на расстоянии  $10 \pm 20$  мм от сопла, затем следует коллиматор диаметром 3,5 мм, удаленный от скиммера на  $20 \pm 75$  мм.

Секступольный разделительный магнит, максимально приближенный к коллиматору ( $8 \pm 28$  мм), длиной 544 мм имеет входную апертуру 5 мм, которая линейно увеличивается вдоль оси и на половине длины магнита достигает 10 мм, оставаясь далее постоянной. Полюсные наконечники изготовлены из пермендюра.

Ионизация осуществляется в разряде Пеннинга. Соленоид, создающий магнитное поле до 1500 Гс, расположен в вакууме. Расстояние между концом секступоля и началом анода ионизатора составляет 390 мм. В этой области расположена ячейка ВЧ-переходов в слабом магнитном поле /9/.

С целью исключения попадания паров масла в разрядную колбу область сопла откачивается двухроторным механическим насосом ДВН-500. Камера скиммера откачивается паромасляным агрегатом ВА-5-4, а камера секступоля - ВА-8-4. Ионизатор снабжен магнито-разрядным насосом НМДО-025-1.

Наиболее оптимальным является расход водорода в диссоциаторе около 1 л.Тор/с, ток поляризованных протонов при этом достигает 15 мкА. Поляризация была измерена в ранних экспериментах с помощью лэмбовского поляриметра /10/ и составляет около 0,9.

## 2.2. Криогенный источник поляризованных ионов "Полярис"

В последние годы в ряде лабораторий были предприняты разработки ИПИ, использующие криогенную откачку и сверхпроводящие магниты. Здесь мы рассмотрим импульсный источник поляризованных дейтронов, созданный в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ /11/ для

синхрофазотрона на 10 ГэВ.

Характерными особенностями этого источника являются:

- а) использование криогенной откачки больших количеств газа;
- б) диссоциация дейтерия при низкой температуре;
- в) применение сверхпроводящих магнитов для создания магнитных полей.

Схематический разрез ИПИ приведен на рис.1. Камера сопла 2, камера скиммера 3 и секступольный сверхпроводящий магнит 4 расположены внутри криостата I с жидким гелием на 51 л. Стенки камер сопла, скиммера и канала секступоля служат криопанелями для откачки газа, выходящего из сопла.

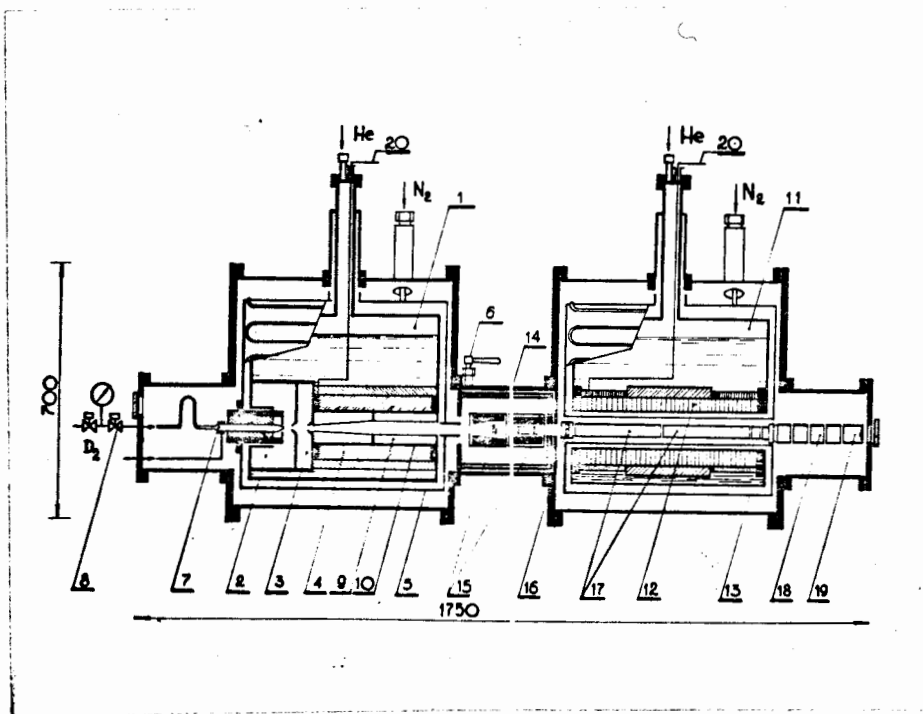


Рис.1 Схематический разрез "Поляриса".

I — гелиевый криостат, 2 — камера сопла, 3 — камера скиммера, 4 — сверхпроводящий секступольный магнит, 5 — азотный экран, 6 — вакуумный вентиль, 7 — диссоциатор, 8 — электромагнитный клапан подачи дейтерия, 9 — полюсные наконечники секступольного магнита, 10 — трубка криостата, 11 — гелиевый криостат, 12 — сверхпроводящий соленоид, 13 — азотный экран, 14 — магнитные экраны, 15 — секция ВЧ-переходов, 16 — нить накала, 17 — анод, 18 — ионная оптика, 19 — коллектор ионов, 20 — токовводы.

Для сокращения испарения жидкого гелия криостаты имеют экраны, охлаждаемые жидким азотом. Азотный экран I3 имеет отверстия для криоткачки газа в ионизаторе.

Диссоциатор 7 имеет U-образную форму и изготовлен из пирекса (трубка длиной 220 мм и диаметром I3 мм). Охлаждение осуществляется через теплопроводность тефлонового корпуса, находящегося в контакте с азотным экраном. Дейтерий поступает в разряд импульсно через электромагнитный клапан 8. Радиочастотная мощность на частоте 100 МГц также подается импульсно. Атомный пучок формируется соплом диаметром 2,2 мм, скиммером диаметром 3,5 мм и коллиматором диаметром 7 мм. Расстояние между соплом и скиммером - 12 мм, между скиммером и началом секступоля - 61 мм.

Секступольный магнит длиной 280 мм сделан так, что ярмо, полюса и обмотки находятся внутри криостата с жидким гелием, а полюсные наконечники в вакууме. Апертура магнита увеличивается от 7 до 12 мм на половине длины, затем остается постоянной. Обмотки выполнены из ниобий-титанового сверхпроводящего кабеля диаметром 0,5 мм, на каждом полюсе 67 витков. Магнит работает в короткозамкнутом режиме. Максимальное значение магнитного поля на краю полюсных наконечников, изготовленных из пермендюра, при токе 50 А составляет примерно 10 кГс.

Ионизатор типа Пеннинга состоит из криостата II с жидким гелием на 46 л и сверхпроводящего соленоида I2 длиной 300 мм. Максимальное магнитное поле в центре при токе 130 А составляет 68 кГс, однако, оптимальный ток равнялся 43 А. На электроды ионизатора питание подается импульсно, синхронно с диссоциатором. На стенде были достигнуты значения тока дейтронов в импульсе 100 мс около 200 мкА.

Испытания установки проводились по 2–3 недели без сублимации дейтерия. Для обеспечения работы требовалось 200 л жидкого гелия в неделю. Поскольку источник устанавливается на колонке с потенциалом 750 кВ важным обстоятельством является низкая потребляемая мощность и компактность источника.

Поляризованные дейтроны были ускорены на синхрофазотроне до максимальной энергии. Получена интенсивность  $\approx 10^8$  дейтронов в импульсе при векторной поляризации  $P_3$  (эксп.) =  $0,5 \pm 0,2$  ( $P_3$  (теор.) =  $2/3$ ).

### 2.3. Холодные атомы водорода.

В последние годы большие достижения в технике ИПИ были связаны с понижением скорости атомов, поскольку это увеличивает акцептанс разделительного магнита и плотность поляризованных атомов в ионизаторе. Холодные атомы водорода получают либо при охлаждении стенок разрядной колбы, либо путем введения потока горячих атомов из разрядной колбы в объем со стенками, поддерживаемыми при низкой температуре /12/.

В работе /13/ сообщается о разработке источника атомов водорода, в котором охлаждение атомов осуществляется непосредственно в разрядной трубке, помещенной в дьюар с жидким азотом. Кварцевая разрядная трубка проходит внутри коаксиального резонатора, связанного со СВЧ-генератором "Луч-1" (частота 2,4 ГГц, мощность 150 Вт). Для исследования спектра скорости атомов формируемого пучка использовался время-пролетный метод. Оказалось, что максвелловский закон не описывает полностью распределение атомов по скоростям. Поэтому температура газа в трубке оценивалась путем сравнения наиболее вероятных скоростей  $\tilde{v}$  для пучков H и H<sub>2</sub> при различных температурах с включенным разрядом и без него. Для теплого пучка она оказалась равной 460 К ( $\tilde{v} = 3,3 \cdot 10^5$  см/с), тогда как

для охлажденного разряда - 90 К ( $\tilde{v} = 1,7 \cdot 10^5$  см/с).

Это значение температуры является практическим пределом для данного способа получения непрерывного пучка холодных атомов, поскольку использование других (кроме жидкого азота) хладагентов будет неприемлемо по соображениям расхода хладагента. Для импульсных источников атомов эта проблема может быть частично преодолена путем охлаждения сопла. Например, в Аргонне /14/ было осуществлено охлаждение пирексового сопла при помощи гелиевого рефрижератора с замкнутым циклом. В результате, на медном кольце, окружающем сопло, была достигнута температура 30 К. Однако измеренная наиболее вероятная скорость ( $\tilde{v} = 1,7 \cdot 10^5$  см/с) показывает, что охлаждение было недостаточным.

Проблема охлаждения атомов в сопле для непрерывного источника была исследована в Бонне /15/. Для двух различных длин сопла (6 и 14 мм) показано, что более длинное сопло дает больший ионный ток при меньшем токе секступольного магнита, что было приписано лучшему охлаждению атомного пучка. С использованием медного сопла, покрытого  $H_3PO_4$ , охлаждаемого жидким азотом, была измерена наиболее вероятная скорость  $\tilde{v} = (1,55 \pm 0,1) \cdot 10^5$  см/с. При охлаждении сопла жидким гелием с включенным разрядом расход составлял 2 л/час. При этом наиболее вероятная скорость молекул дейтерия уменьшилась от 842 м/с ( $T = 77$  К) до 651 м/с. Для атомов водорода ожидаемая  $\tilde{v}(T = 4$  К)  $\approx 1200$  м/с. В таблице I приведены результаты измерений скоростей атомов. Следует отметить, что для охлаждения сопла ежедневно требовалось около 200 л жидкого азота.

В работе новосибирской группы /16/ исследовано истечение из медного сопла-канала, охлаждаемого жидким азотом. Наиболее вероятная скорость атомов водорода, измеренная по отклонению пучка в магните Раби, составила  $1,6 \cdot 10^5$  см/с, что согласуется с результатами работ /13,15/.



Таблица I.

Газ	H	D	H <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>
T сопла, К	77	77	77	77	295	295	4
$\tilde{v}$ , м/с	1549 $\pm$ 104	1087 $\pm$ 79	1113 $\pm$ 75	842 $\pm$ 56	1738 $\pm$ 140	1325 $\pm$ 86	651 $\pm$ 42

Хорошо известно, что для достижения высокой степени диссоциации, необходима примесь к водороду паров воды или кислорода /18/. В этой связи интересен результат в сообщении /13/, что при охлаждении разрядной трубки степень диссоциации уменьшается. Для холодного источника максимальная степень диссоциации ( $\alpha_{\text{макс.}} = 50\%$ ) достигалась при давлении 0,5 Тор и расходе газа  $6 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1}$  (в случае теплого источника /18/  $\alpha_{\text{макс.}} = 96\%$ ). В работе боннской группы /15/, где охлаждалось только сопло, степень диссоциации составила  $(80 \pm 1,8)\%$ .

#### 2.4. Фокусировка и ионизация атомного пучка.

Для разделения атомов по состояниям поляризации электрона чаще всего используются секступольные электромагниты, которые обладают фокусирующими свойствами. Фокальная длина определяется градиентом магнитного поля и скоростью атомов. Для данной апертуры градиент ограничивается полем  $B_m$  на полюсном наконечнике, так как происходит насыщение магнитного материала. Обычно у секступоля  $B_m = 7-9 \text{ кГс}$ . Значение 12 кГс, по видимому, является верхним пределом. Для пучков с низкой скоростью могут оказаться подходящими постоянные мультипольные магниты из самарий-кобальтового сплава /19/.

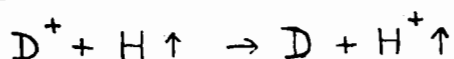
Сокращение средней скорости атомов при охлаждении диссоциатора или сопла требует полной переделки обычного магнита для того, чтобы полностью использовать преимущества охлаждения. При совре-

менной технике может быть получен половинный угол акцептанса  $\approx 10^\circ$ , что соответствует телесному углу  $\approx 10^{-1}$  стеррад. Это дает выигрыш 20 по сравнению с телесным углом действующих источников.

Наиболее эффективным ионизатором в настоящее время является, по видимому, конструкция, разработанная в Цюрихе /20/. Были исключены ограничивающие факторы предыдущего ионизатора: короткая область ионизации, отсутствие независимого контроля потенциала ионизационного столба и неудобное расположение системы вытягивания ионов в краевом поле соленоида. Это привело к значительному увеличению размеров системы ионизации, которая теперь располагается внутри соленоида длиной 45 см и внутренним диаметром 16 см. Соленоид находится снаружи вакуумного кожуха, который, также как катушки, имеет потенциал земли.

В непрерывном режиме ионизатор дает пучок с хорошим эмиттансом и током более 100 мкА. Можно предполагать, что увеличение плотности атомов до достигнутой в Бонне /15/  $(5,7 \pm 0,6) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  позволит увеличить ионный ток до 200 мкА в непрерывном режиме и 400 мкА в импульсе /1/.

Недавно был предложен метод ионизации поляризованных атомов с помощью перекомпенсированного протонного или дейтронного пучка /21/. Перекомпенсация достигается в устройстве, получившем название плазменной линзы /22/. В ионизаторе, работающем по этому принципу, поляризованные протоны возникают в результате реакции перезарядки



Эффективность ионизации определяется плотностью тока дейтронного пучка, которая в компенсированных импульсных пучках с энергией около 10 кэВ может достигать 1 А/см<sup>2</sup> /23/. Для длины области ионизации 10 см и скорости атомов  $3 \cdot 10^5$  см/с расчетная эффектив-

ность ионизации равняется 0,2.

### 3. Заключение

За последние годы был сделан существенный прогресс в увеличении как непрерывных (до 200 мкА), так и импульсных (до 200 мкА) токов поляризованных протонов и дейтронов. Высказаны идеи, которые могут при их реализации сделать интенсивности ускоренных поляризованных частиц на синхротронах того же порядка величины, что и неполяризованных частиц. Наиболее интересным представляется развитие криогенных источников /II/, возможно, с накоплением поляризованных ионов в электронно-лучевой ловушке /24/. Не ясны пока, хотя заманчивы перспективы метода лазерной накачки поляризации /25,26/. Ускорение поляризованных дейтронов на синхрофазотроне ОИЯИ открывает широкие перспективы экспериментальных исследований в физике высоких энергий. Для работы с ускорителями на энергию  $\sim 1$  ГэВ необходимы ИПИ непрерывного действия. Перспективным направлением здесь является классическая схема по методу атомного пучка, сочетающая криогенные и теплые узлы, что позволит достичь непрерывный ток поляризованных протонов до 200 мкА.

Т.м.

## Литература

1. Haerberli W. In: Proc.Int.Symp. on High Energy Physics with Polarized Beams and Polarized Targets, Lausanne, 1980, p. 199
2. Haerberli W. Ann.Rev.Nucl.Sci., 1967, v. 17, p. 373
3. Плис Ю.А., Сороко Л.М. УФН, 1972, т.107, с. 281
4. Glavish H.F. et al. In: Proc.Univ.of Michigan Polarization Meeting, Ann.Arbor,1977, p. 47
5. Максимов Ю.В. и др. ОИЯИ, БИ-9-81-805, Дубна, 1981
6. Clausnitzer G. et al. NIM, 1970, v. 80, p. 245
7. Dierke R. Funkschau, 1961, v. 10, p. 261
8. Плис Ю.А., Сороко Л.М. ОИЯИ, Р9-10413, Дубна, 1977
9. Плис Ю.А., Сороко Л.М. ОИЯИ, Р9-9945, Дубна, 1976
10. Плис Ю.А., Сороко Л.М., ПТЭ, 1977, № 3, с. 44
11. Pilipenko Yu.K. et al. cit./1/, p. 429
12. Леонас В.Б. УФН, 1981, т. 133, с. 707
13. Евланов Е.Н. и др. ПТЭ, 1981, № 3, с. 155
14. Schultz et al. In: AIP Conf.Proc. No. 69, N.Y., 1981, p. 909
15. Mathews H.G. Doktorarbeit, Bonn, 1979
16. Попов С.Г., Топорков Д.К. Препринт 80-129, Новосибирск, 1980
17. Мак-Таггарт Ф. Плазмохимические реакции в электрических разрядах. М., Атомиздат. 1972
18. Евланов Е.Н., Лебедев Ю.В. ПТЭ, 1980, № 3, с. 176
19. Halbach K. NIM,1980, v. 169, p. 1
20. Schmelzbach P.A. et al. NIM, 1981, v. 186, p. 655
21. Белов А.С., Якушев В.П. ИЯИ АН СССР, П-0129, Москва, 1979
22. Габович М.Д. и др. Письма в ЖТФ, 1977, т. 3, с. 1153
23. Димов Г.И., Росляков Г.В. ИЯФ СО АН СССР, 35-73, Новосибирск, 1973

24. Донец Е.Д., Плис Ю.А., ОИЯИ, Р9-5446, Дубна, 1970
25. Anderson L.W. NIM, 1979, v. 167, p. 363
26. Зеленский А.Н., Кохановский С.А. ИЯИ АН СССР, П-0176,  
Москва, 1980