

ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОНОВ И ИОНОВ H^-

А.Н.Зеленский, С.А.Кохановский, В.М.Лобашев, В.Г.Полушкин

Экспериментально исследован процесс поляризации протонов при захвате электронов у оптически ориентированных атомов натрия в сильном магнитном поле. При перезарядке в поле 15 кГс получена степень поляризации $65 \pm 3\%$. Представлены результаты разработки источника поляризованных протонов и ионов H^- для ускорителей, основанного на новом методе поляризации.

Представлены результаты разработки источника поляризованных протонов нового типа, основанного на предложенном Завойским методе поляризации при захвате протонами поляризованных электронов¹. Использование лазерного излучения для оптической ориентации по электронному спину атомов в перезарядной мишени позволяет существенно повысить эффективность процесса поляризации^{2,3}. В работе⁴ авторы исследовали оптическую ориентацию паров натрия. При использовании импульсного лазера на красителе получена степень поляризации $90 \pm 5\%$, при толщине мишени $\sim 3 \cdot 10^{13}$ ат/см². При захвате электронов у натрия значительная доля атомов водорода образуется в возбужденных $2S, 2P$ -состояниях. Чтобы избежать деполяризации из-за спин-орбитального взаимодействия в этих состояниях, величина магнитного поля в области перезарядки и до перехода в основное состояние должна быть $10 \div 20$ кГс^{5,6}. Однако, перезарядка в магнитном поле приводит, как известно⁷, к росту фазового объема пучка и, в результате, к значительным потерям интенсивности.

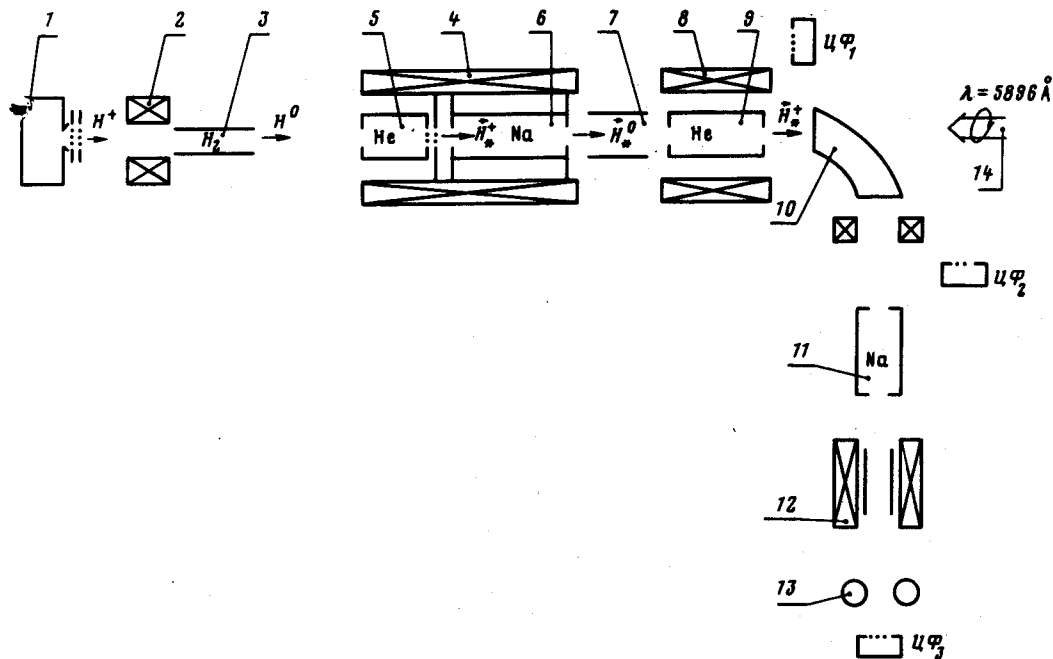


Рис. 1. Схема лазерного источника поляризованных протонов: 4, 8 – импульсные соленоиды; 5, 9 – гелиевые ячейки с импульсным напуском газа; 13 – детектор метастабильных атомов водорода

На рис. 1 приведена схема источника поляризованных протонов, в котором реализовано предложение авторов^{8,9} позволяющее преодолеть эту трудность. В установке протоны из источника 1, фокусируются при помощи соленоида 2 и нейтрализуются в газовой мишени 3¹⁰. Пучок атомов водорода инжектируется в соленоид 4, в который помещена дополнительная ионизирующая гелиевая ячейка 5. Протоны, образовавшиеся в ячейке, замедляются потенциалом ~ 1 кВ и затем снова нейтрализуются при захвате поляризованных электронов в натриевой мишени 6. В этом случае пучки на входе и выходе соленоида нейтральны и роста эмиттанса при взаимодействии с краевыми полями соленоида не происходит. Замедление протонов позволяет устранить в поворотном магните 10 неполяризованную компоненту пучка, которая образуется из нейтралов, прошедших через ячейку 5 без перезарядки. Отклоняющие пластины 7 удаляют из пучка остаточные ионы.

Магнитное поле в ионизаторе равно 1,5 кГс и направлено противоположно полю в натриевой ячейке. В этих условиях сверхтонкое взаимодействие в атоме водорода приводит к передаче поляризации от электрона к протону при неадиабатическом прохождении области изменения направления магнитного поля¹¹. Ионизация атомов происходит во второй гелиевой ячейке. Образование ионов H^- можно осуществить при использовании в ионизаторе паров щелочных металлов, либо ксенона.

Для измерения поляризации используется перезарядка протонов в метастабильные $H(2S)$ состояния в натриевой ячейке поляриметра 11. Заселенности подуровней сверхтонкой структуры $H(2S)$ зависят от поляризации протонов. Анализ распределения по спиновым состояниям осуществляется посредством пропускания пучка через "спиновый фильтр" 12 и регистрации разности в скорости счета Лайман-альфа детектора, которая связана с изменением направления поляризации протонов^{9,12}. В качестве "спинового фильтра" используется соленоид с магнитным полем 570 Гс, внутри которого находятся пластины, создающие поперечное электрическое поле 20 В/см. Смешивание $2S$ и $2P$ уровней электрическим полем усиливается при пересечении подуровней $2S_{1/2}(m_J = -\frac{1}{2})$ и $2P_{1/2}(m_J = \frac{1}{2})$ в поле 570 Гс. При этом атомы с $m_J = -\frac{1}{2}$ переходят в основное состояние за время порядка времени жизни разрешенного $2P \rightarrow 1S$ перехода, атомы с $m_J = \frac{1}{2}$ проходят без потерь⁴. Измерения вели-

чины тока протонов производились в прямом пучке датчиком ЦФ₁, после поворота и разделения по энергиям на входе в поляриметр ЦФ₂ и в конечном ЦФ₃ измерялся ток протонов после поляриметра. Эквивалентный ток исходного пучка нейтральных атомов I_0 , прошедших через систему поляризации, измеренный при ионизации в гелиевой ячейке составил около 15 мА. Наличие двух гелиевых ячеек позволяет легко определить эффективность ионизации $\epsilon_{\text{He}} \cong 0,7$ при энергии пучка 7 кэВ. В этих измерениях протоны, образованные в первой ячейке отклоняются электрическим полем и величина остаточной нейтральной компоненты измеряется при ионизации во второй ячейке.

Измерения степени поляризации атомов натрия по электронному спину⁴, позволили определить толщину натриевой перезарядной мишени с высокой степенью поляризации, а следовательно и эффективность захвата поляризованного электрона $\epsilon_{\text{Na}} \cong 0,3$. Тогда полная эффективность процесса поляризации с учетом трех перезарядок $\epsilon = I_{\text{п}}/I_0 = \epsilon_{\text{He}}^2 \epsilon_{\text{Na}} \cong 0,15$, $I_{\text{п}}$ — полный ток поляризованных протонов. На опыте $I_{\text{п}}$ определяется по приросту тока в ЦФ₁ при нагреве натриевой ячейки. При температуре ячейки, соответствующей максимальному значению степени поляризации протонов $I_{\text{п}} = 2$ мА. Близость $I_{\text{п}}$ к расчетному значению говорит об отсутствии потерь интенсивности, связанных с увеличением расходимости пучка при перезарядке в магнитном поле. Величина $I_{\text{п}}$ не меняется при увеличении магнитного поля в первом соленоиде от 5 до 20 кГс. Нормализованный эмиттанс пучка не превышает 0,1π см · мрад. Таким образом, применение дополнительных перезарядок позволяет преодолеть трудности с ростом расходимости и дает возможность увеличить магнитное поле для повышения степени поляризации.

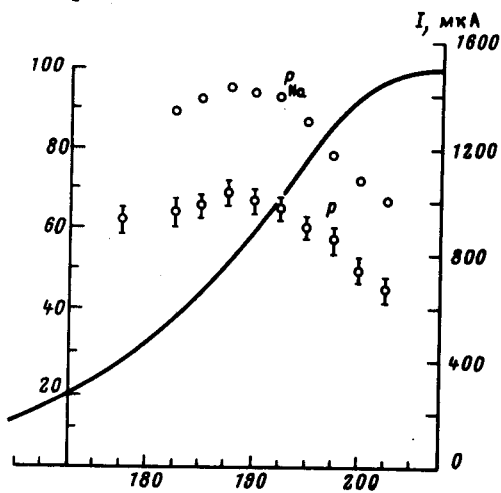


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость тока поляризованных протонов I в ЦФ₂, поляризации атомов натрия по электронному спину P_{Na} и поляризации протонов P от температуры натриевой ячейки, T , °С

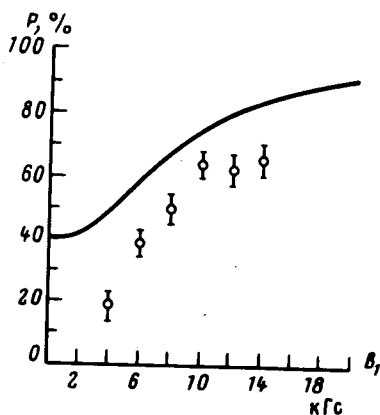


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость степени поляризации протонов от величины магнитного поля в натриевой ячейке. Сплошная кривая — результаты⁶ расчета

При выводе протонного пучка и включении системы разделения по энергии происходит значительная потеря интенсивности. На рис. 2 приведена зависимость величины тока поляризованных протонов после поворотного магнита в ЦФ₂, от температуры натриевой ячейки. Видно, что ток с холодной ячейки не превышает 2% от максимальной величины интенсивности, что говорит об эффективности способа устранения фона остаточной нейтральной компоненты пучка при разделении по энергии.

На этом же рис. 2 приведены результаты измерений степени поляризации протонов. При нагреве ячейки и повышении плотности натрия степень поляризации протонов падает, так как и степень поляризации натрия. Причина падения поляризации, по-видимому, связана с захва-

том резонансного излучения, возникающего при спонтанных переходах в процессе оптической накачки.

Несмотря на значительные потери при выводе пучка, получен рекордный ток поляризованных протонов около 1 мА с $P = 65 \pm 3\%$, 1,4 мА с $P = 45\%$ при работе с системой замедления и 3,5 мА, $P = 30\%$ без разделения по энергии. Оптимизация системы разделения и вывода пучка должна уменьшить потери и приблизить интенсивность протонов с высокой степенью поляризации к 2 мА, полученным в прямом пучке. При использовании в ионизаторе вместо гелия ксенона получен ток поляризованных ионов H^- около 60 мкА. Режим работы источника импульсный, частота 1 Гц. Длительность тока поляризованных протонов 20 мкс обусловлена длительностью импульса лазера на красителе с ламповой накачкой. Ведется разработка непрерывного источника со сверхпроводящим соленоидом и непрерывным лазером на красителе.

Дальнейшая работа по совершенствованию источника протонов, системы формирования и вывода пучка, по-видимому, позволит получить пучки поляризованных протонов с интенсивностью 10 мА и ионов H^- с интенсивностью 1 мА с эмиттансом допустимым для ускорителей высоких энергий.

В заключение авторы выражают благодарность Рослякову Г.В. (ИЯФ СО АН СССР), Нижегородцеву В.П. (ИФВЭ, г. Серпухов) за предложение способа формирования интенсивного пучка нейтральных атомов, Виноградову Л.П. за изготовление наиболее сложных узлов источника и лазерной системы, Берлеву А.И. за разработку блоков электроники поляриметра, Прохвятилову М.А. за большой вклад в создание автоматизированной системы измерения поляризации, Вишневскому К.Н. за помощь в проведении измерений.

Литература

1. Завойский Е.К. ЖЭТФ, 1957, 32, 731.
2. Anderson L.W. NIM, 1979, 167, 363.
3. Зеленский А.Н., Кохановский С.А. Труды Второго Всесоюзного совещания по программе исследований на мезонной фабрике, М., 1982, с. 259.
4. Зеленский А.Н., Кохановский С.А. Письма в ЖЭТФ, 1982, 36, 21.
5. Шамсвский В.Г., Шатунов Ю.М. Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям. Дубна, 1978, с. 102.
6. Hinds E.A. et. al. NIM, 1981, 189, 599.
7. Ohlsen G.G. et. al. NIM, 1969, 73, 45.
8. Адо Ю.М. и др. Препринт ИФВЭ, 82-54, Серпухов, 1982.
9. Зеленский А.Н., Кохановский С.А. Труды Международного семинара по спиновым явлениям в физике высоких энергий, Серпухов, 1984, с. 39.
10. Росляков Г.В. и др. ДАН СССР, 1983, 271, 1380.
11. Sona P.A. Energia nucleare, 1967, 14, 295.
12. Плис Ю.А., Сороко Л.М. ПТЭ, 1977, №3, 44.