

МЕТОД ПОЛЯРИЗАЦИИ УСКОРЕННЫХ ПРОТОНОВ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*А.Н.Зеленский, С.А.Кохановский, В.М.Лобашев,
Н.М.Соболевский*

Предложен метод поляризации протонов в пучке быстрых атомов водорода лазерным излучением. Интенсивный пучок атомов с энергией 160 – 3000 МэВ может быть получен при нейтрализации ускоренных отрицательных ионов водорода. Реализация метода позволит получить импульсный ток протонов на два порядка превышающий величину тока получаемого другими способами.

Ускорение протонов, поляризованных в источниках, позволило значительно увеличить интенсивность ускоренных поляризованных пучков, повысить их степень поляризации. Наряду с классическими методами, в последнее время для получения пучков поляризованных ядер щелочных металлов лития и натрия разработан метод оптической ориентации циркулярно - поляризованным лазерным излучением. Использование для этих целей современных мощных перестраиваемых лазеров на красителе позволило получить высокую эффективность процесса поляризации и получить пучок с рекордными параметрами. Схема оптической ориентации атома водорода изображена на рис. 1. При поглощении право-поляризованного фотона полный момент атома F увеличивается на единицу $\Delta m_F = 1$. При спонтанном излучении возможны переходы с $\Delta m_F = 0, \pm 1$. Поэтому в процессе ориентации равновесная заселенность изменяется так, что остаются заселенными только подуровни с $m_F = 2$ в возбужденном и $m_F = 1$ в основном состоянии, в которых и электроны и протоны имеют 100%-ную поляризацию. Изменение направления поляризации осуществляется при изменении циркулярной поляризации излучения. Однако, отсутствие в настоящее время достаточно интенсивных источников излучения с длиной волны 1216 Å, необходимого для возбуждения этих переходов, не позволяет реализовать этот метод непосредственно в источниках поляризованных протонов.

Существует возможность использовать доплеровское смещение длины волны излучения в доступную для лазеров область, если использовать пучок быстрых атомов $\beta = v/c \geq 0,5$. Быстрые нейтралы (БН) можно получить при обдирке отрицательных ионов водорода в электрическом поле, либо при необходимости выделения коротких импульсов нейтралов в процессе фотонейтрализации. Уникальная возможность для получения интенсивного пучка БН открывается на линейном ускорителе ИЯИ АН СССР, где предполагается ускорить до энергии 600 МэВ пучок H^- с током в импульсе 50 мА, длительностью импульса 100 мкс, частота повторения 100 Гц, степень монохроматичности на выходе $\Delta p/p = 10^{-3}$. Учет доплеровского сдвига $\lambda_0 = 1216 \text{ Å}$ для встречного направления пучка и лазерного луча, дает необходимую для поляризации длину волны: $\lambda = \lambda_0 \gamma(1 + \beta)$, $\gamma = 1 + T/mc^2$, m – масса протона. При изменении T от 160 до 600 МэВ, λ – изменяется от 2160 до 3570 Å. Для получения пере-

страиваемого в этом диапазоне излучения можно использовать удвоение частоты лазеров на красителях. Диапазон перестройки $4320 - 7140 \text{ \AA}$ лежит в области генерации эффективных красителей. Для поляризации протонов с энергией $600 - 2500 \text{ МэВ}$ необходимо излучение с длиной волны $3570 - 9000 \text{ \AA}$ — это область работы лазеров на красителях.

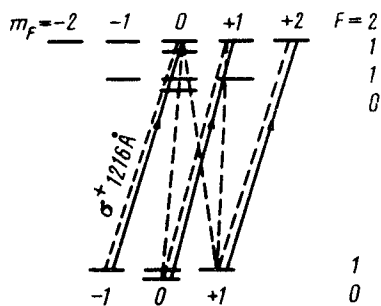


Рис. 1

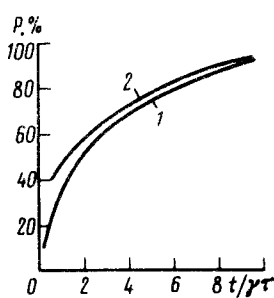


Рис. 2

Рис. 1. Схема оптической ориентации атома водорода. Сплошные линии — вынужденные переходы, штриховые — спонтанные.

Рис. 2. Зависимость степени поляризации протонов от времени нахождения в лазерном луче. 1 — просуммировано по всем подуровням, 2 — поляризация в возбужденных состояниях

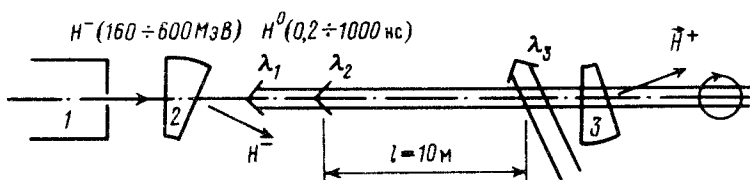


Рис. 3. Схема лазерной поляризации ускоренных протонов: 1 — линейный ускоритель H^- , 2, 3 — поворотные магниты, λ_1 — лазер для фотонейтрализации, λ_2 — лазер поляризатор, λ_3 — лазер для фотоионизации

Доплеровское уширение линии поглощения, связанное с продольным разбросом скоростей ускоренных частиц:

$$\Delta\nu = \nu_0 \Delta p / \gamma m c = 2 \cdot 10^{12} \text{ Гц}, \quad \nu_0 = c / \lambda_0.$$

Тонкое расщепление уровней $2P_{1/2}$, $2P_{3/2}$ составляет $1,1 \cdot 10^{10}$ Гц, поэтому возбуждаются переходы на все уровни, как показано на рис. 1. Мощность излучения, необходимая для насыщения этих переходов w_H во всем интервале скоростей атомов составляет около 20 кВт/см^2 . В случае, если $w \geq w_H$, за время нахождения атома в поле лазерного излучения $t = l / \beta c$ число поглощенных фотонов в среднем составит: $n = t / 2\gamma\tau \approx 10$, $\tau = 1,6 \text{ нс}$ — время спонтанного перехода $2P \rightarrow 1S$, $l = 10 \text{ м}$. На рис. 2 приведена рассчитанная методом Монте-Карло зависимость степени поляризации протонов от времени. Видно, что при разумной длине области облучения $l = 10 \text{ м}$ можно получить высокую $\sim 90\%$ степень поляризации. Далее можно, либо непосредственно использовать БН с поляризованными в них протонами в ядерно-физических экспериментах, либо ионизировать атомы, отщепив на перезарядной мишени электрон, тогда их можно отклонять и фокусировать. Как было отмечено выше, в процессе оптической ориентации половина атомов оказывается в возбужденном $m_F = 2$ состоянии. Если для ионизации БН использовать лазерное излучение, вызывающее переходы с $n = 2$ на $n = 5 \div 10$ и дальше отщепить электрон в сильном электрическом поле, то степень поляризации образующихся протонов будет даже выше, чем при ионизации из основного состояния (см. рис. 2, кривая 2). Это связано с тем, что возбужденные состояния с самого начала заселяются неравновесным образом. Для переходов $2 \rightarrow 10$ можно также использовать излучение лазера на красителе. При правильном выборе угла пересечения пучка и луча необходимая длина волны излучения может быть получена при использовании эффективных красителей.

Возможная схема лазерной поляризации ускоренных протонов показана на рис. 3. Эффективность процесса поляризации должна быть близка к 100%, и интенсивность пучка поляризованных протонов равна интенсивности начального пучка ионов H^- около 50 мА. Таким образом в этом методе можно получить импульсную интенсивность на два — три порядка превышающую достигнутую в настоящее время. Получение высокой средней интенсивности требует применения мощных лазеров. Практически в настоящее время необходимую мощность излучения можно получить при использовании ламповых лазеров на красителе (энергия в импульсе 1 Дж) с последующим удвоением частоты. В этом случае можно будет получать импульсы тока поляризованных протонов с длительностью 1 мкс с частотой до 100 Гц. Средний ток до 5 мкА.

В процессе ионизации лазерным излучением, можно осуществить монохроматизацию пучка поляризованных протонов до $\Delta p/p \sim 10^{-4} - 10^{-5}$. Для этого оптическая ориентация и дальнейшее возбуждение БН осуществляется в достаточно узком интервале скоростей атомов. При этом соответственно на один — два порядка уменьшается полная мощность излучения, необходимая для насыщения переходов.

При фотонейтрализации H^{-3} , либо в процессе ионизации можно выделить и поляризовать отдельные сгустки из микроструктуры ускоренного пучка длительностью 0,2 нс. Использование коротких импульсов монохроматичных поляризованных протонов с высокой интенсивностью в методике времени пролета может открыть новые возможности в ядерной спектроскопии.

В заключение авторы выражают благодарность М.И.Грачеву и С.К.Есину за полезные обсуждения рассмотренных выше вопросов.

Литература

1. *Мурин Б.П.* Труды Пятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Изд-во Наука, 1977, 1, 302.
2. *Letochov V.S., Minogin V.G.* Phys. Rev. Lett., 1978, 41, 775.
3. *Барит И.Я. и др.* Препринт ИЯИ, П-0233, Москва 1982.