
УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.665

УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В НАКОПИТЕЛЬНОМ КОЛЬЦЕ, РАБОТАЮЩЕМ В СПИН-ПРОЗРАЧНОМ РЕЖИМЕ

© 2022 г. А. Е. Аксентьев^a, *, А. А. Мельников^a, Ю. В. Сеничев^a

^aИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

*E-mail: alexaksentev@gmail.com

Поступила в редакцию 28.06.2021 г.

После доработки 09.07.2021 г.

Принята к публикации 19.07.2021 г.

Исследована принципиальная возможность управления ориентацией оси поляризации пучка в накопительном кольце, работающем в спин-прозрачном режиме, посредством использования спин-навигаторных соленоидов. В частности, рассмотрена спин-динамика пучка дейtronов в данной структуре и исследованы свойства структуры с точки зрения деполяризации пучка по механизму спин-декогеренции.

Ключевые слова: накопительное кольцо, спин-прозрачный режим, поляризованный пучок, спин-декогеренция, спин-навигаторы

DOI: 10.56304/S2079562922010018

ВВЕДЕНИЕ

В предполагаемом методе управления поляризацией пучка в спин-прозрачном (“Spin Transparency,” далее ST-) режиме частота прецессии спина пучка устанавливается близкой к нулю (в системе центра масс) за счет использования “сибирских змеек.” Поскольку в ST-режиме частицы находятся вблизи целочисленного резонанса, для стабилизации требуемого направления поляризации в детекторе используются соленоиды – “навигаторы” со слабыми полями (рис. 1), вращающие спин-векторы частиц пучка на малые углы. [1] Для того, чтобы задать частоту спин-прецессии и направление оси поляризации пучка в точке MPD-детектора используются две пары (K_z1 , K_z2) соленоидов-навигаторов, поворачивающие спин-вектор референсной частицы вокруг оптической оси (z) на углы, соответственно: $\Phi_{z1} = \pi v \cos \Psi_{MPD}$ и $\Phi_{z2} = \pi v \sin \Psi_{MPD} / \sin \varphi_x$, где v – задаваемая (нормализованная) частота спин-прецессии, Ψ_{MPD} – задаваемый угол наклона оси поляризации в детекторе в плоскости $y-z$ (ось y коллинеарна ведущему полю), φ_x – угол поворота импульса референсной частицы в магнитном диполе K_x (не является существенно необходимой частью системы управления; особенность данного кольца).

Необходимо отметить, что одновременное выполнение условия нулевой частоты спин-прецессии для всех частиц в сгустке возможно лишь с некоторой точностью, ввиду конечности величины фазового объема сгустка. В результате различий в спин-орбитальном движении частиц сгустка может возникнуть дисперсия направлений их спин-векторов (спин-декогеренция), и как следствие – деполяризация пучка.

Для сохранения поляризации пучка необходимо создать условия, при которых распределение направления оси спин-прецессии частицы в фазовом объеме будет максимально однородным. Целью данной работы было изучение спин-орбиталь-

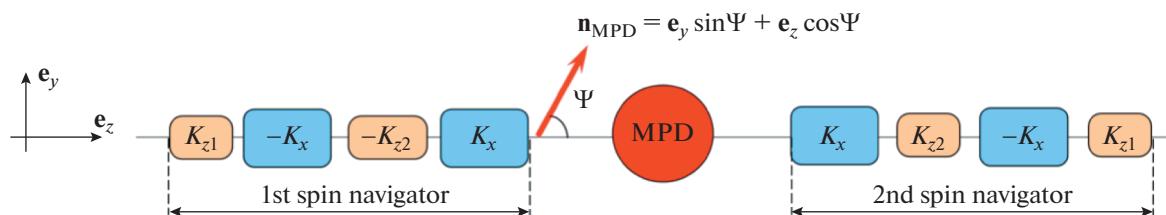


Рис. 1. Схема расположения “навигаторных” соленоидов в промежутке MPD-детектора.

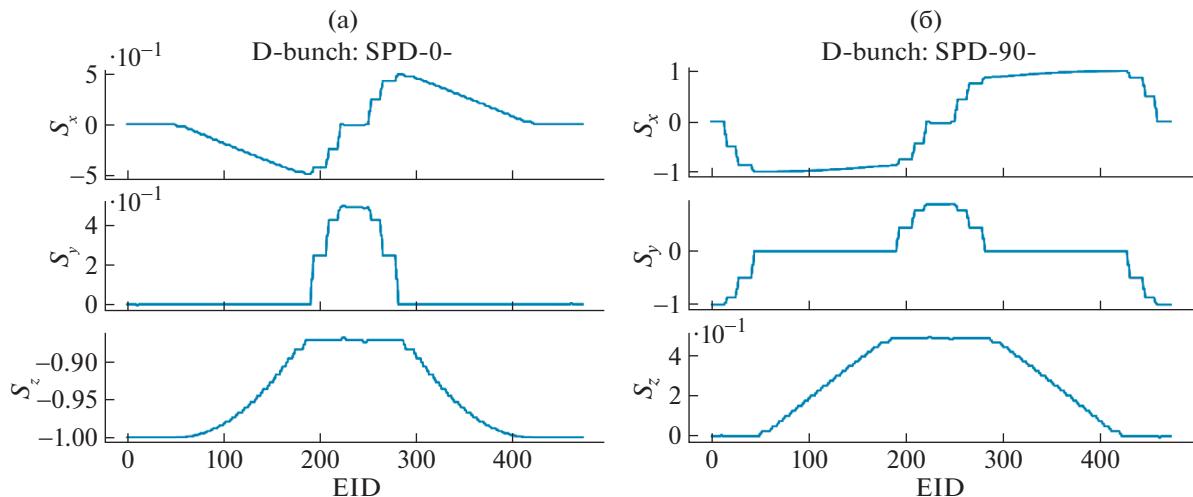


Рис. 2. Изменение ориентации спин-вектора референсной частицы. (а) Случай продольно-ориентированной оси поляризации в точке инжекции. (б) Случай вертикально-ориентированной оси поляризации в точке инжекции.

ного движения частиц в сгустке вблизи нулевого спинового резонанса и определение возможности управления направлением оси поляризации пучка в заданной точке ускорителя посредством спин-навигаторных соленоидов.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПИН-ОРБИТАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ

Исследование спин-орбитальной динамики пучка проводилось посредством численного моделирования в среде COSY INFINITY. [2] Был проведен трекинг трех сгустков (обозначаемых X , Y , D) по 300 частиц через модель оптической структуры кольца в четырех основных случаях: (1) направление оси поляризации в точке инжекции (SPD-детектор) вертикально вверх (SPD-90+), (2) вертикально вниз (SPD-90-), (3) вдоль дви-

жения пучка (SPD-0+), (4) против движения пучка (SPD-0-). Все частицы сгустка при инжекции имели одинаковое начальное направление спин-вектора, сонаправленное с осью поляризации (таким образом, начальная поляризация сгустка равна 1). Сгустки X , Y , D различаются начальным распределением частиц в фазовом пространстве: ± 2 мм по координате x , y , и $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ по приведенной кинетической энергии. (Все три распределения Гауссовские.) Изменение ориентации оси поляризации осуществляется посредством создания асимметрии в распределении магнитного поля, вводимой спин-навигаторными соленоидами, чем и обусловлено отдельное рассмотрение случаев (1) и (2) (соответственно, (3), (4)).

Трекинг проводился на протяжении $3 \cdot 10^6$ оборотов, что соответствует приблизительно 10.5 с

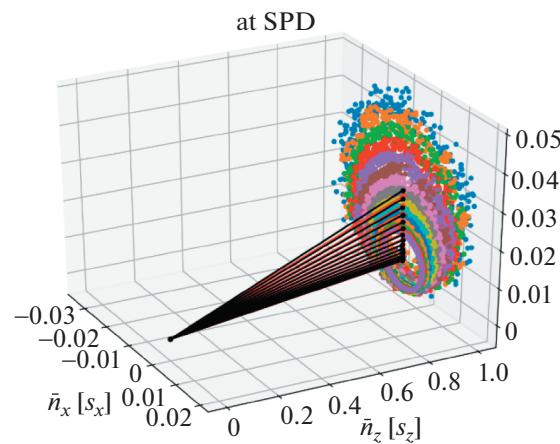


Рис. 3. Равновесные значения осей конусов спин-прецессии для разных частиц сгустка. Цветом обозначены описываемые спин-векторами частиц окружности.

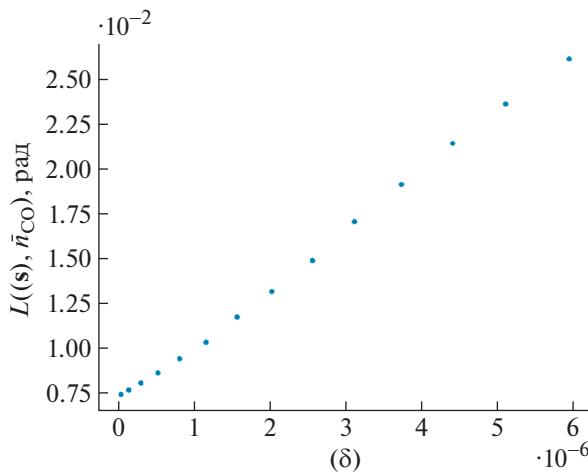


Рис. 4. Угол отклонения оси конуса прецессии спин-вектора частицы от референсного значения в зависимости от равновесной энергии частицы.

реального времени нахождения пучка в ускорителе. Также был проведен поэлементный трекинг пучка за один оборот, с целью наблюдения функционирования спин-транспарентного режима (примеры результатов представлены на рис. 2).

В отношении спин-динамики пучка в структуре был сделан следующий основной вывод: прецессия спин-вектора каждой из частиц пучка происходит по поверхности конуса (рис. 3), угол раствора которого (равно как и направление его оси) зависит от эффективного значения кинетической энергии частицы (рис. 4).

Как раскрытие угла раствора конуса, по поверхности которого происходит прецессия спин-вектора частицы, так и отклонение оси этого конуса от оси конуса, соответствующего референсной частице, оказывают негативное влияние на поляризацию пучка.

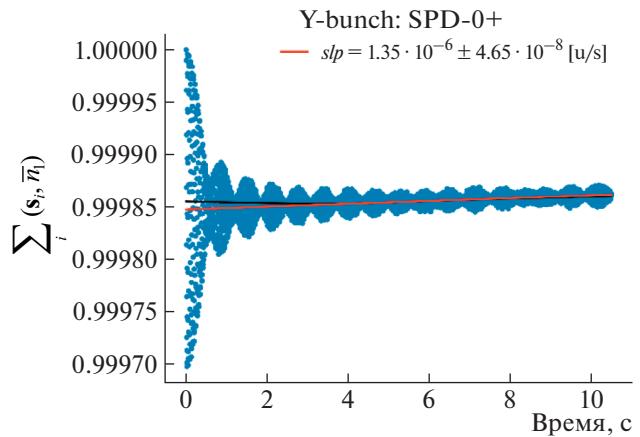


Рис. 5. Зависимость поляризации пучка от времени для случая продольной ориентации оси поляризации в точке инжекции. На легенде указана скорость спада поляризации, полученная путем линейной регрессии методом наименьших квадратов.

ванность пучка; таким образом, энергетическая дисперсия сгустка, являясь причиной обоих феноменов, является также причиной деполяризации пучка по механизму спин-декогеренции. Помимо этой причины, обусловленной спиновой динамикой частиц, рассмотренному методу управления поляризацией присущи причины деполяризации, связанные с орбитальной динамикой пучка.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПИН-ДЕКОГЕРЕНЦИИ

Под спин-декогеренцией понимается систематический рост дисперсии направлений спин-векторов частиц пучка. Следствием спин-декогеренции является деполяризация пучка, и уменьшение полезной длительности измерительного цикла.

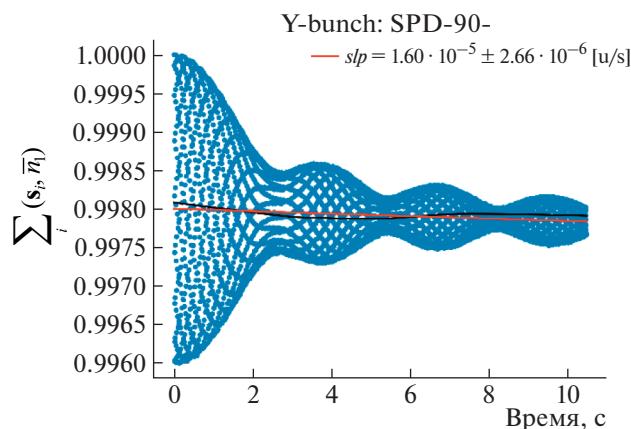


Рис. 6. То же самое для случая вертикального направления (созданного “спин-навигаторами”) оси поляризации в точке инжекции. Представленные данные получены для сгустка, совершающего бетатронные колебания в вертикальной плоскости (“Y-bunch”); для “X-bunch” зависимости аналогичны.

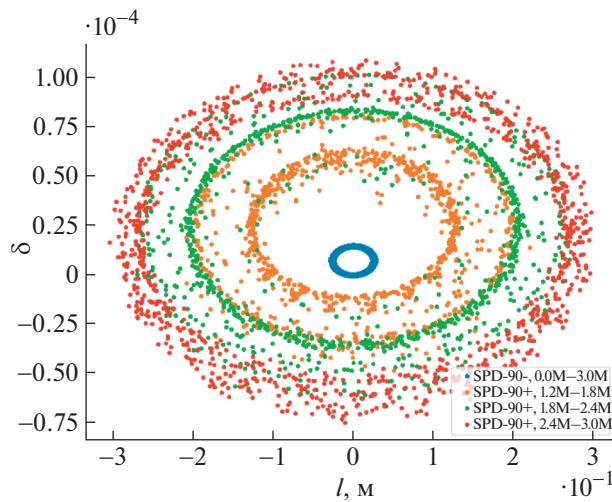


Рис. 7. Сравнение продольных фазовых эллипсов двух рассмотренных случаев: SPD-90- (эллипс синего цвета) и SPD-90+. В случае SPD-90+ данные были разделены на три диапазона, что позволяет видеть систематическое разрастание фазового объема пучка.

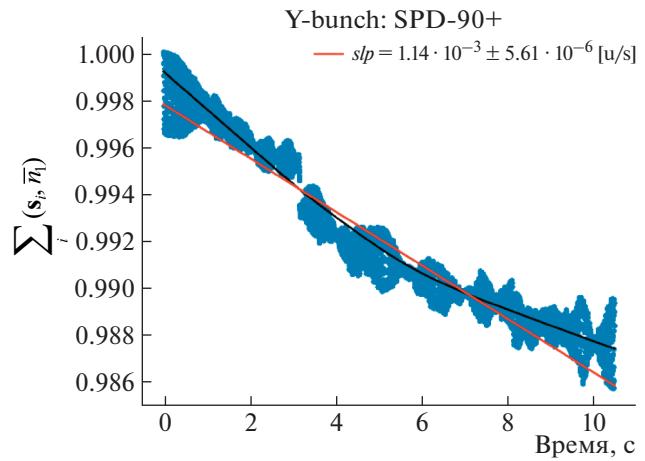


Рис. 8. Зависимость поляризации пучка от времени в нестабильном случае. Линейная экстраполяция данных мотивирует ожидание полной деполяризации пучка в течение 1000 с.

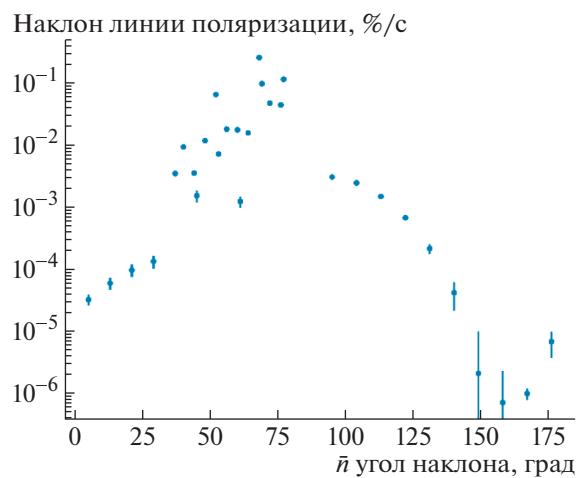


Рис. 9. Зависимость скорости деполяризации (полученной посредством линейной регрессии методом наименьших квадратов), от установленного в точке инъекции (посредством “спин-навигаторов”) направления оси поляризации пучка.

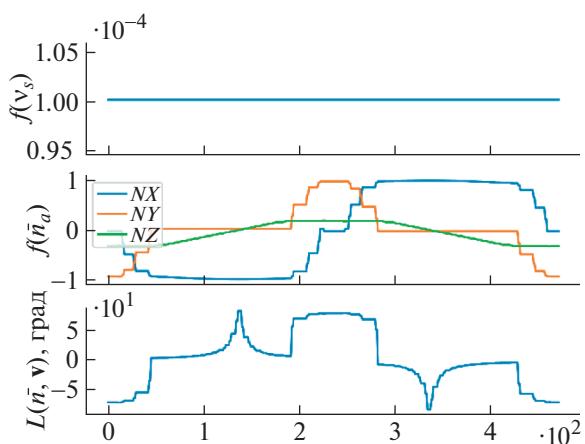


Рис. 10. Случай наибольшей скорости деполяризации (соответствует углу наклона оси поляризации в точке инъекции 72°). На нижней панели изображено распределение угла наклона оси поляризации вдоль оптической оси ускорителя (по горизонтальной оси отложен порядковый номер элемента в кольце). Как можно видеть, распределение крайне асимметрично относительно середины ускорителя (MPD-детектор).

В исследовании, поляризация определялась как сумма проекций на ось поляризации спин-векторов частиц, нормированная на их число в сгустке: $\mathbf{P} = N^{-1} \Sigma_j (\mathbf{s}_j, \mathbf{n})$. Нужно отметить, что в зависимости от требований эксперимента, под поляризацией пучка можно понимать сумму проекций на ось, отличную от оси поляризации; в случае, когда эта ось ортогональна оси поляризации, мы имеем эксперимент с нулевым математическим

ожиданием поляризации, и соответственно – наибольшую скорость деполяризации.

Поскольку в рассматриваемом эксперименте участвовали пучки с математическим ожиданием поляризации близким к единице, значительной деполяризации пучка не ожидалось. Тем не менее, в связи с тем, что метод управления направлением оси поляризации основан на создании асимметрии в распределении магнитного поля в

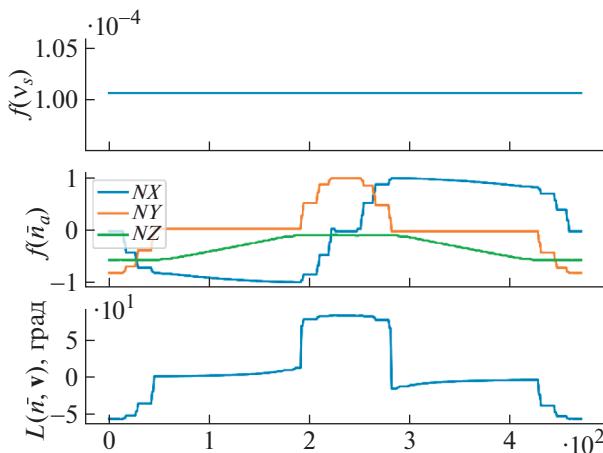


Рис. 11. В представленном случае асимметрия распределения угла наклона оси поляризации меньше (в точке инжекции он составляет 56°); также меньше и скорость деполяризации.

ускорителе, имела место возможность дестабилизации орбитального движения частиц, которая действительно была обнаружена.

Примеры полученных результатов представлены на рис. 5 и 6. В большинстве рассмотренных случаев, обнаруженная деполяризация не имела практически-значимых величин; однако, в процессе исследования найден случай нестабильного фазового движения пучка (рис. 7), при котором скорость деполяризации принимает значимую величину (рис. 8).

НЕСТАБИЛЬНЫЙ СЛУЧАЙ

Предположительно, наблюдаемая на рис. 7 нестабильность фазового движения обусловлена асимметричностью распределения магнитного поля в кольце, созданной соответствующими настройками спин-навигаторных соленоидов. В пользу этого предположения говорят результаты исследования, представленные на рис. 9–12.

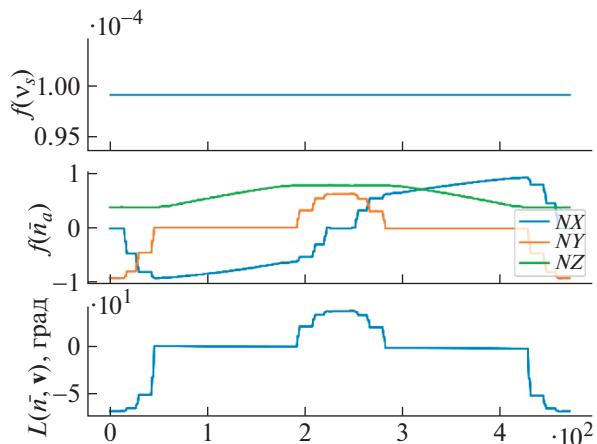


Рис. 12. Случай стабильного фазового движения. Распределение угла наклона симметрично (в точке инжекции – 113°).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подтверждена принципиальная возможность управления направлением оси поляризации пучка в накопительном кольце, работающем в спин-прозрачном режиме, посредством использования спин-навигаторных соленоидов. Рассмотрены механизмы деполяризации пучка, в том числе – специфичные исследуемому методу управления поляризацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Кондратенко А.М., Кондратенко М.А., Филатов Ю.Н., Коваленко А.Д., Бутенко А.В., Михайлов В.А., Сырецин Е.М., Шиманский С.С. Поляризованные ионы в комплексе NICA. Обоснование проекта. 2018. Дубна: ОИЯИ.
2. Berz M. // in “Nonlinear Problems in Future Particle Accelerators”. 1991. Singapore: World Scientific. P. 288–296. <https://www.bmtdynamics.org/cgi-bin/display.pl?name=caprimap>.

Manipulation of Beam Polarization Orientation in a Spin-Transparent Storage Ring

A. E. Aksentev¹, *, A. A. Melnikov¹, and Y. V. Senichev¹

¹Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

*e-mail: alexaksentyev@gmail.com

Received June 28, 2021; revised July 9, 2021; accepted July 19, 2021

Abstract—The feasibility of manipulating the beam polarization axis in a spin-transparent storage ring by means of spin-navigating solenoids has been investigated. In particular, deuteron beam spin dynamics in the given lattice and the lattice’s properties with respect to beam depolarization via spin decoherence have been considered.

Keywords: storage ring, spin-transparent mode, polarized beam, spin-decoherence, spin-navigators