

О ВОПРОСАХ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ СТОХАСТИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПУЧКОВ ИОНОВ НА СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ НУКЛОТРОН ОИЯИ

А. Г. Кобец, А. О. Сидорин, Г. В. Трубников, Н. А. Шурхно

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Объединенный институт ядерных исследований приступил к созданию уникального ускорительно-коллайдерного комплекса NICA — Nuclotron-based Ion Collider Facility, который планируется ввести в эксплуатацию в 2016 г. Светимость коллайдера, которая должна поддерживаться на рекордно высоком уровне $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, по расчетам, будет постепенно уменьшаться, главным образом, из-за эффекта внутривидового рассеяния. Поэтому для поддержания высокого уровня светимости необходимо включить в базовый проект ускорителя систему охлаждения. Из двух методов охлаждения, наиболее часто применяемых в настоящее время для пучков тяжелых ионов — электронного и стохастического, — наиболее привлекательным представляется стохастическое охлаждение. Однако в России отсутствует опыт разработки и эксплуатации таких систем. Поэтому в настоящее время на ускорителе нуклотрон готовится к проведению эксперимент по стохастическому охлаждению для знакомства с техникой и возможностями метода. В статье приводится краткое описание метода стохастического охлаждения, методика расчета динамики охлаждения и описание создаваемой экспериментальной установки.

Joint Institute for Nuclear Research (JINR) initiated the creation of a unique heavy-ion collider — Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA), which is planned to be operational in 2016. The luminosity in the colliding beams of gold ions is expected to reach $10^{27} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. By met estimates it will be mainly determined by the intra-beam scattering effect. To maintain high luminosity level, it was proposed to use the cooling of the beam. For the medium and high-energy heavy ions, such as NICA collider, stochastic cooling will be more efficient, than electron cooling, so this system will be used in the collider. But there's no experience of creation and operation of such systems in Russia. Therefore, the experiment on stochastic cooling at accelerator Nuclotron is prepared to explore technique and possibilities of this method. In this report short description of stochastic cooling, method of calculating cooling dynamics and description of prepared experimental setup are presented.

PACS: 29.20.-c; 29.25.-t

ВВЕДЕНИЕ

Объединенный институт ядерных исследований приступил к созданию уникального ускорительно-коллайдерного комплекса NICA — Nuclotron-based Ion Collider Facility, который планируется ввести в эксплуатацию в 2016 г. [1]. Создание коллайдера преследует две цели. Первая — это изучение состояния смешанной фазы и указаний на

существование критических точек при переходах ядерной материи из адронного состояния в кварк-глюонную плазму, для чего планируется проводить исследования свойств горячей и плотной барионной материи в столкновениях тяжелых ионов. Вторая — внести вклад в решение проблемы «спинового кризиса» путем изучения структуры спина нуклонов в столкновениях поляризованных пучков легких ионов.

Для достижения первой цели столкновения тяжелых ионов нужно проводить при очень высокой интенсивности пучков. Светимость коллайдера должна поддерживаться на рекордно высоком уровне $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что предъявляет серьезные требования к его проектированию. Как показывают расчеты, поддержание средней светимости на таком уровне невозможно без эффективного охлаждения пучков в течение эксперимента.

Из двух методов охлаждения, наиболее часто применяемых в настоящее время для пучков тяжелых ионов — электронного и стохастического, — наиболее привлекательным представляется стохастическое охлаждение. В отличие от электронного охлаждения оно не приводит к дополнительным потерям частиц (рекомбинация ионов с охлаждающими электронами) и значительно проще по технической реализации. Однако в России отсутствует опыт разработки и эксплуатации систем стохастического охлаждения, а ряд особенностей коллайдера NICA не позволяет напрямую применить технические решения, используемые в зарубежных научных центрах. Наибольшей трудностью является необходимость охлаждать сгруппированный пучок с большой величиной пикового тока. Поэтому разработка системы охлаждения коллайдера требует проведения предварительных экспериментальных исследований по изучению предельных возможностей метода.

С этой целью в настоящее время подготовлено проведение эксперимента по стохастическому охлаждению ускоренного пучка ионов, циркулирующего в нуклотроне на плато магнитного поля. Для сокращения сроков подготовки и проведения эксперимента работа осуществляется в тесном сотрудничестве с исследовательским центром IKP FZ (г. Юлих, Германия), где в настоящее время разрабатывается система стохастического охлаждения для накопителя HESR, сооружаемого в рамках проекта FAIR (г. Дармштадт, Германия).

Стохастическое охлаждение — это процесс уменьшения амплитуд бетатронных колебаний или энергетического разброса пучка частиц (соответственно, охлаждение поперечной и продольной степеней свободы) с помощью системы обратной связи. Общая идея метода такова: в некоторой точке кольца ускорителя измеряется поперечная координата или отклонение энергии частиц от номинального значения с помощью пикап-электродов. Затем сигнал обрабатывается, усиливается и воспроизводится импульсным корректирующим устройством — кикером, расположенным на некотором расстоянии от пикапа по ходу движения пучка. Время задержки распространения сигнала в линии обратной связи подбирается таким образом, чтобы оно оказалось равным времени пролета частицы с номинальной энергией от пикапа до кикера. При охлаждении поперечных степеней свободы дополнительно накладывається условие на величину набега фазы поперечных колебаний при движении частиц от пикапа до кикера.

При оптимальном выборе параметров системы время охлаждения распущенного пучка можно грубо оценить по следующей формуле [2]:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{W (1 - \tilde{M}^{-2})^2}{N M + U/Z^2}, \quad (1)$$

где τ — это время охлаждения; W — ширина полосы пропускания линии обратной связи; N — количество частиц в ускорителе; M — фактор перемешивания частиц при

пролете от пикапа до кикера и \tilde{M} — при пролете от кикера до пикапа соответственно; U — отношение мощностей шум/сигнал; Z — заряд иона.

Параметры N и Z — характеристики пучка. Чем больше заряд иона Z , тем сильнее амплитуда сигнала, наведенного на электродах пикапа, и тем эффективнее охлаждение. W — характеристика частотного диапазона линии обратной связи. Для уменьшения времени охлаждения желательно иметь полосу пропускания системы как можно шире, однако для каждой энергии подбирается свой оптимальный диапазон ширины полосы частот, и он не должен быть максимально большим. Кроме ограничений, связанных с техническими возможностями мощной электроники, ширина полосы ограничена также параметрами ускорителя и разбросом по импульсу в охлаждаемом пучке. Время пролета частицы от пикапа до кикера увеличивается (или уменьшается), если ее импульс отличается от номинального значения. Если разница между временами пролета частицы и прохождения сигнала через радиотехническую линию становится больше длительности импульса, приложенного к кикеру, охлаждение перестает работать. Характерная длительность импульса, приложенного к кикеру, обратно пропорциональна ширине полосы пропускания системы W . Соответственно, условие эффективной работы системы охлаждения принято формулировать в виде ограничения на фактор перемешивания частиц при пролете от пикапа к кикеру:

$$M \approx WT_{\text{pk}}\eta \frac{\Delta p}{p} > 1, \quad (2)$$

где T_{pk} — время пролета от пикапа до кикера частицы с номинальным значением импульса; $\eta = \frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\gamma_{\text{tr}}^2}$ — слип-фактор ускорителя.

Выбор полосы частот системы стохастического охлаждения определяется следующими соображениями. Пикап и кикер — резонансные устройства, их проектируют на среднюю частоту полосы пропускания, при этом чувствительность симметрично «спадает» при больших и меньших частотах. Для обеспечения приемлемой чувствительности во всем диапазоне частот верхняя частота, как правило, выбирается в два раза больше нижней. Хорошо освоенным в мировой практике и в то же время не представляющим серьезных радиотехнических трудностей является диапазон 2–4 ГГц, т. е. полоса 2 ГГц.

Предварительный расчет по формуле (1) дает для времени охлаждения значение порядка 8–9 с, в зависимости от энергии пучка (10^9 протонов с энергией 1,5–3,5 ГэВ).

1. ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА НУКЛОТРОНЕ

Нуклотрон — сверхпроводящий синхротрон с периметром 251,5 м и магнитной жесткостью до 45 Тл·м — работает в ОИЯИ начиная с 1993 г. [3, 4]. Ускоритель предназначен для ускорения тяжелых многозарядных ионов с энергией до 6 ГэВ/нукл. (для отношения заряда к массе $z/A = 1/2$), пучков протонов и поляризованных пучков дейтронов. Магнитная структура состоит из восьми суперпериодов, каждый содержит три регулярных периода типа ФОДО и один период без дипольных магнитов (большой прямолинейный промежуток). Регулярный период включает в себя фокусирующую и дефокусирующую квадрупольные линзы, четыре дипольных магнита и два малых свободных промежутка, предназначенных для размещения мультипольных корректоров и устройств диагностики

пучка. Большие прямолинейные промежутки используются для размещения устройств ввода и вывода пучка, ВЧ-ускоряющих станций, устройств диагностики и т. п.

Кикер системы стохастического охлаждения должен находиться при комнатной температуре (ввиду того, что в нем выделяется достаточно большая тепловая мощность). В нуклотроне имеется единственный «теплый» большой прямолинейный промежуток (седьмой по ходу пучка, начиная с точки инъекции), в котором располагается станция внутренних мишеней. В этом же промежутке имеется достаточно места и для размещения кикера. При этом для размещения пикапа оптимальным является третий промежуток, расположенный диаметрально противоположно седьмому (рис. 1). Этот промежуток находится при криогенной температуре (от 4 до 15 К), что позволяет уменьшить мощность теплового шума с пикапа.

Лоренц-фактор, соответствующий критической энергии нуклотрона, составляет примерно 9,16. Ожидаемый относительный разброс по импульсу ускоренного пучка не превышает 10^{-3} (что примерно соответствует вертикальному размаху сепаратрисы при ускорении).

Основные параметры нуклотрона и системы охлаждения приведены в табл. 1.

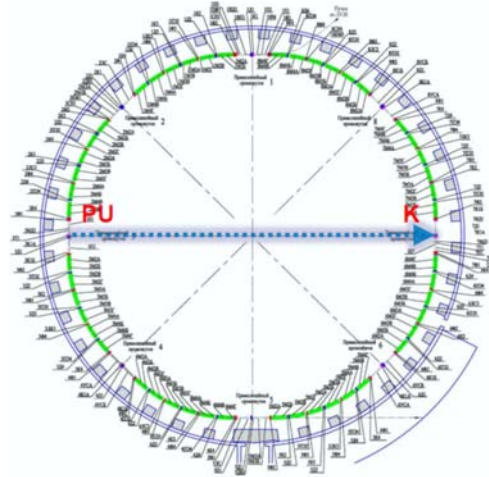


Рис. 1. Схема кольца нуклотрона с предлагаемым расположением элементов системы охлаждения: пикапа и кикера

Таблица 1. Параметры тестовой системы стохастического охлаждения на нуклотроне

Периметр ускорителя, м	251,5
Охлаждаемые ионы	d^+ , C^{6+}
Энергия, ГэВ/нукл.	3,5
Максимальное относительное отклонение по импульсу	10^{-3}
Слип-фактор кольца η	0,0322
Полоса пропускания системы f_{\min}/f_{\max} , ГГц	2/4
Интенсивность охлаждаемого пучка	10^9
Ожидаемое время охлаждения, с	< 10

Чтобы уверенно зарегистрировать эффект охлаждения, интенсивность пучка должна быть на уровне нескольких единиц на 10^9 частиц. Это с большим запасом может быть обеспечено на нуклотроне для полностью ободранных ионов углерода или дейтронов. Также крайне важно иметь достаточно времени для охлаждения. Время, доступное для охлаждения пучка, определяется возможностями системы электропитания магнитов и линз нуклотрона. В настоящее время стандартная длительность плато магнитного поля при работе на эксперимент с выведенным пучком составляет примерно 10 с. Сейчас на

нуклотроне проводится модернизация систем питания с тем, чтобы можно было обеспечить длительность плато до 1000 с. В таком случае процесс настройки системы, частотного анализа пучка и попытки наблюдения эффекта охлаждения сильно упрощаются.

Создаваемый на нуклотроне канал стохастического охлаждения планируется последовательно использовать для проверки различных методов охлаждения продольной степени свободы распущенного и сгруппированного пучка: метода режекторных фильтров, метода Пальмера и времяпролетного метода. Не исключена и возможность охлаждения поперечной степени свободы, трудность в осуществлении которого связана, в первую очередь, с необходимостью обеспечения нужного набега фазы поперечных колебаний на участке от пикапа до кикера, что требует перестройки рабочей точки ускорителя.

Структура создаваемой системы ориентирована на реализацию, в первую очередь, продольного охлаждения по методу режекторного фильтра. Для оценки основных параметров системы (в первую очередь, необходимой мощности усилителя) был разработан алгоритм и проведено численное моделирование эволюции функции распределения частиц путем решения уравнения Фоккера–Планка.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТОХАСТИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА НУКЛОТРОНЕ С ПОМОЩЬЮ УРАВНЕНИЯ ФОККЕРА–ПЛАНКА

Процесс охлаждения продольной степени свободы можно проанализировать с помощью уравнения Фоккера–Планка [5]. Оно описывает эволюцию во времени функции распределения частиц пучка $\Psi(E, t) = dN/dE$:

$$\frac{\partial \Psi(E, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial E} \left(F(E) \Psi(E, t) - D(E, t) \frac{\partial \Psi(E, t)}{\partial E} \right) = 0. \quad (3)$$

Дрейфовый член $F(E) = f_0 \Delta E_c$, или сила трения, описывает охлаждение пучка, а диффузионный $D(E, t) = 1/2 f_0 \langle \Delta E_{ic}^2 \rangle$ — эффекты, приводящие к «нагреву» пучка. Здесь $\Delta E_c(E)$ — когерентное изменение энергии за оборот и $\Delta E_{ic}(E, t)$ — часть энергии, связанная с некогерентными шумовыми эффектами, f_0 — частота обращения.

Коэффициенты уравнения Фоккера–Планка выводятся через параметры радиотехнических элементов системы охлаждения, представленной на рис. 2. Сигнал от пучка, снимаемый с пикапа, усиливается, фильтруется и с соответствующей задержкой прикладывается к кикеру. В первую очередь планируется экспериментально опробовать так называемый метод фильтров (метод Торндалла). Он заключается в следующем: в электронную схему (рис. 2), передающую сигнал от пикапа к кикеру, включается радиотехнический фильтр, который «вырезает» из основного сигнала гармоники частоты обращения

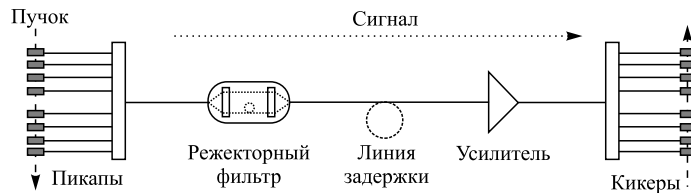


Рис. 2. Схема передачи сигнала от пикапа к кикеру, включающая периодический режекторный фильтр, усилитель и задержку

равновесной частицы и инвертирует фазу сигнала. В результате сигнал коррекции не воздействует на равновесные частицы, но в то же время доускоряет медленные частицы и замедляет быстрые, т. е. уменьшает разброс по продольной компоненте импульса.

Кроме сигнала, наведенного на пикапе равновесной частицей, в нем присутствуют и сигналы, наведенные другими частицами пучка. Этот некогерентный эффект зависит от мощности дробового шума пучка (шоттки-шума) и приводит к диффузионному увеличению разброса по импульсу. Причиной еще одного источника «нагрева» пучка, связанного с работой системы охлаждения, являются тепловые шумы элементов радиотехнического тракта, приложенные к кикеру.

Выражения для дрейфового и диффузионного членов выводятся на основе передаточной функции системы, которая получается в результате перемножения передаточных функций ее основных элементов: пикапа, кикера, усилителей, режекторного фильтра и линии задержки: $V(\omega) = S_{\text{kicker}}(\omega)T_{\text{delay}}(\omega)G_{\text{amp}}(\omega)H_{\text{notch}}(\omega)S_{\text{pick-up}}(\omega)Z_0I(\omega)$.

1) *Пикап*. Ток заряженных частиц i_b наводит на электродах пикапа с импедансом Z_0 напряжение $V_p = S_p Z_0 i_b$. S_p — амплитудно-частотная характеристика пикапа (или чувствительность пикапа). Для четвертьволновых электродов она выражается так [8, 9]:

$$S(x, \omega) = \exp \left[-i \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \right] \sin \theta f_g(x, w, h), \quad \theta = \frac{1}{2c} \left(\frac{1}{\beta_s} + \frac{1}{\beta_b} \right) \omega L. \quad (4)$$

Здесь β_s — скорость распространения сигнала в пластине электрода; β_b — скорость пучка; L — длина электрода. f_g — геометрический фактор пикапа (в электростатике — это величина поля конечной заряженной пластины) выражается следующим образом:

$$f_g(x, w, h) = \frac{2}{\pi} \arctg \left(\frac{\text{sh}(\pi w/2h)}{\text{ch}(\pi x/h)} \right), \quad (5)$$

где w — ширина пластин; h — расстояние между ними, а x — расстояние между орбитой пучка и центром пластины.

Для системы из n_p пикапов и кабеля с импедансом Z_L полное выходное напряжение будет

$$V(\omega) = \sqrt{n_p} \sqrt{\frac{Z_L Z_0}{2}} i_b(\omega) S(x, \omega). \quad (6)$$

Обычно импедансы пикапа и системы выбираются одинаковыми (стандартно — 50 Ом). В этом случае напряжение запишется как

$$V(\omega) = \sqrt{\frac{n_p}{2}} Z_0 i_b(\omega) S(x, \omega). \quad (7)$$

Ток одной частицы с зарядом Q и частотой обращения $f'_0 = f_0 + \Delta f_0$ представляет собой сумму дельта-функций:

$$i_b(t) = Qe \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta \left(t - \frac{n}{f'_0} \right), \quad (8)$$

которая при разложении в ряд Фурье дает следующее выражение:

$$i_b(t) = Qe \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta \left(t - \frac{n}{f'_0} \right) = Qe f'_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(i2\pi n f'_0 t) \equiv \sum_{n=-\infty}^{\infty} i_n(\omega'), \quad \omega' = 2\pi f'_0. \quad (9)$$

И выходное напряжение с пикапа окончательно запишется как

$$V_{\text{PU}}(f'_0, t) = \sqrt{\frac{n_p}{2}} Z_0 \sum S_p(x, n\omega'_0) i_n(\omega') = \\ = Q e f'_0 \sqrt{\frac{n_p}{2}} Z_0 \sum S_p(x, n\omega'_0) \exp(in\omega'_0 t). \quad (10)$$

2) *Режекторный фильтр.* Передаточная функция для идеального периодического режекторного фильтра (нотч-фильтра) записывается как [8, 9]:

$$H(\omega) = |H(\omega)| e^{i\phi_{\text{nf}}(\omega)}, \quad (11)$$

с амплитудой

$$|H(\omega)| = 2g_{\text{notch}} \left| \frac{\omega - n\omega_0}{\omega_0} \right|, \quad \left(n - \frac{1}{2} \right) \omega_0 < f < \left(n + \frac{1}{2} \right) \omega_0, \quad (11a)$$

фазой

$$\phi_{\text{nf}}(\omega) = \begin{cases} +\frac{\pi}{2}, & n\omega_0 < \omega < \left(n + \frac{1}{2} \right) \omega_0, \\ -\frac{\pi}{2}, & \left(n - \frac{1}{2} \right) \omega_0 < \omega < n\omega_0, \end{cases} \quad (11b)$$

n — номер гармоники тока пучка; g_{notch} — амплитуда нотч-фильтра.

Данную передаточную функцию удобнее переписать, используя выражения для относительной частоты и кинетической энергии:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = -\frac{\Delta T_F}{T_F} = \eta_{\text{pk}} \frac{\Delta p}{p_0}, \quad \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{1 + \gamma}{\gamma} \frac{\Delta p}{p_0}. \quad (12)$$

Поэтому

$$\frac{\Delta T_F}{T_F} = \kappa \frac{\Delta E}{E}, \quad \kappa = \eta \frac{\gamma}{1 + \gamma}. \quad (13)$$

И для передаточной функции нотч-фильтра окончательно получается

$$H(n\omega'_0) = i2g_{\text{notch}} \kappa \frac{\Delta E}{E_0} \exp\left(-in\kappa\pi \frac{\Delta E}{E_0}\right). \quad (14)$$

3) *Усилитель.* Коэффициент усиления системы для упрощения моделирования можно считать равным нулю вне полосы частот системы, а в полосе равным $G = G_{\text{amp}}(\omega)$. Задержка сигнала в усилителе (и во всей электронике) учитывается в следующей линии задержки.

4) *Задержка.* Линия задержки выбирается таким образом, чтобы время пролета равновесной частицы от пикапа к кикеру T_F было равным времени распространения сигнала в кабеле T_D . Его выбирают приблизительно равным времени пролета равновесной частицы: $T_D = T_F + \Delta T_D$, где ΔT_D — устанавливаемая задержка времени распространения сигнала. Таким образом, передаточная функция линии задержки системы запишется как

$$T_{\text{delay}}(\omega) = e^{-i\omega T_D}. \quad (15)$$

5) *Кикер*. Если используется кикер такой же конструкции, что и пикап, то его передаточная функция будет записана аналогично пикапу. И для n_k кикеров передаточная функция будет равна

$$S_k(x, \omega) = \sqrt{2n_k} \exp \left[-i \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \right] \sin \theta f_g(x, w, h). \quad (16)$$

2.1. Выражение дрейфового члена через параметры системы. Напряжение на кикере выражается через передаточные функции компонент системы:

$$V_k(t) = Qe f_0' \frac{Z_0}{\sqrt{2}} \sqrt{n_p} \sum S(x, n\omega_0') G_{\text{amp}}(nf_0') H(nf_0') \exp(in\omega_0'(t - T_D)). \quad (17)$$

Тогда частица, прошедшая пикап в момент времени $t = 0$, индуцирует на кикере напряжение

$$V_k(t = T_F + \Delta T_F) = Qe f_0' \frac{Z_0}{\sqrt{2}} \sqrt{n_p} \left(1 + \kappa \frac{\Delta E}{E} \right) \times \\ \times \sum G_{\text{amp}}(nf_0') \operatorname{Re} [S(x, n\omega_0') H(nf_0')] \exp(i(\arg(S) + \arg(H)) - in\xi), \quad (18)$$

где

$$\xi = -\omega_0'(T_F + \Delta T_F) + \omega_0' T_D = \omega_0'(\Delta T_D - \Delta T_F) = \\ = \omega_0' \left(\Delta T_D + \kappa_{\text{pk}} T_F \frac{\Delta E}{E} \right) \approx \omega_0 T_F \left(\kappa_{\text{pk}} \frac{\Delta E}{E} + \frac{\Delta T_D}{T_F} \right). \quad (19)$$

Напряжение, поданное на кикер, создает продольное электрическое поле между электродами, которое изменяет энергию частиц. Это изменение энергии равно

$$\Delta E_c(\omega) = \frac{Qe}{A} S_k(\omega) V_k(\omega). \quad (20)$$

Подставляя выражения для передаточной функции кикера и напряжения на нем, получаем

$$\Delta E_c = \frac{Qe}{A} \sum S_k(\omega) V_k(\omega) = 2 \frac{(Qe)^2}{A} f_0 G_{\text{amp}} \left(1 + \kappa \frac{\Delta E}{E} \right) Z_0 \sqrt{n_p n_k} g_{\text{notch}} \times \\ \times \sum_{n=n_1}^{n_2} S_p(x, n\omega_0') H(n\omega_0') S_k(x, n\omega_0') e^{i(\beta - n\xi)} = 2 \frac{(Qe)^2}{A} f_0 G_{\text{amp}} \left(1 + \kappa \frac{\Delta E}{E} \right) \times \\ \times Z_0 \sqrt{n_p n_k} g_{\text{notch}} f_p f_k \sum_{n=n_1}^{n_2} 2n\kappa \frac{\Delta E}{E} [n \sin(2\theta + n\xi) \sin^2 \theta] \cong \\ \cong -4 \frac{(Qe)^2}{A} f_0 G_{\text{amp}} \kappa \frac{\Delta E}{E} Z_0 \sqrt{n_p n_k} f_p f_k \sum_{n=n_1}^{n_2} [n \sin(2\theta + n\xi) \sin^2 \theta],$$

где

$$\theta = \frac{1}{2c} \left(\frac{1}{\beta_s} + \frac{1}{\beta_b} \right) \omega' L, \quad \omega' = n\omega_0 \left(1 + \kappa \frac{\Delta E}{E} \right). \quad (21)$$

Наконец, когерентный член можно записать в окончательной форме:

$$F(E) = f_0 \Delta E_c \cong \frac{Qe}{A} \sum S_k(\omega) V_k(\omega) \cong \\ \cong -4 \frac{(Qe)^2}{A} f_0^2 G_{\text{amp}} \kappa \frac{\Delta E}{E} Z_0 \sqrt{n_p n_k} f_p f_k \sum_{n=n_1}^{n_2} [n \sin(2\theta + n\xi) \sin^2 \theta]. \quad (22)$$

2.2. Выражение диффузионного члена через параметры системы. Некогерентный член $D(E, t)$ пропорционален мощности шума, который состоит из двух компонент: теплового шума усилителя P_T и шума пучка P_B (шоттки-шума). Используя передаточную функцию кикера S_k , можно выразить некогерентный член уравнения (энергия на нуклон):

$$D(E, t) = \frac{1}{2} f_0 \langle \Delta E_{\text{ic}}^2 \rangle = \frac{1}{2} f_0 \left\langle \left(\frac{Qe}{A} S_k V_k \right)^2 \right\rangle = \frac{1}{2} f_0 \left(\frac{Qe}{A} \right)^2 S_k^2 Z_0 (P_T + P_B). \quad (23)$$

1) *Выражение для мощности шоттки-шума.* Для N частиц в кольце ускорителя, используя (8), ток запишем таким образом:

$$I(t) = Qe f_0 \sum_n \sum_h \delta(t - hT_{0n}) = \\ = \sum_{n=1}^N Qe f_0 \cos \theta_n + 2Qe f_0 \sum_{n=1}^N \sum_{h=1}^{\infty} \cos(2\pi h f_n t + h\theta_n). \quad (24)$$

Тогда среднеквадратичное значение тока на h -й гармонике

$$I_{\text{rms}}^h = \sqrt{\langle I^2 \rangle} = \sqrt{\left\langle \left(2Qe f_0 \sum_n \cos(h\theta_n) \right)^2 \right\rangle} = \sqrt{2N} Qe f_0. \quad (25)$$

Спектральная плотность мощности шоттки-шума на выходе пикапа равна

$$\frac{dP_b}{df} = I_f^2 \left(\sqrt{\frac{n_p}{2}} Z_0 \right)^2 = (Qe f_0')^2 Z_0 n_p S_p^2(x, \omega) \frac{dN}{df}. \quad (26)$$

Отсюда мощность, приходящаяся на гармонику:

$$P_b = (Qe f_0')^2 f_0 Z_0 n_p S_p^2(x, \omega) \frac{dN}{df}. \quad (27)$$

Используя передаточные функции компонентов системы, выразим мощность на кикере:

$$P_b = (Qe f_0')^2 f_0 Z_0 n_p S_p^2(x, \omega) \frac{dN}{df} G_{\text{amp}}^2 |H(n f_0')|^2. \quad (28)$$

Суммируя мощность шума по всем гармоникам, входящим в полосу пропускания системы, получаем

$$P_b = (Qe f_0')^2 f_0 Z_0 n_p G_{\text{amp}}^2 \sum_{n=n_1}^{n_2} |S_p(x, n\omega_0')|^2 |H(n f_0')|^2 \Psi(n f_0'), \quad (29)$$

где $\Psi(n f_0') = \frac{1}{n} \frac{dN}{df} = \frac{1}{n} \Psi(f)$.

Перейдем в функции распределения от частоты к энергии:

$$\Psi(f) = \frac{dN}{dE} \frac{dE}{df} = \frac{\beta^2 E}{\eta f_0} \Psi(E). \quad (30)$$

Используя функцию распределения в таком виде, можно окончательно записать часть некогерентного члена, связанного с шумом пучка:

$$\begin{aligned} D_b(E, t) &= \frac{1}{2} f_0' \langle (\Delta E_{ic}^b)^2 \rangle = \frac{1}{2} f_0' \left(\frac{Qe}{A} \right)^2 S_k^2 Z_0 P_b = \\ &= \frac{4(Qe)^4}{A^2} f_0^3 Z_0^2 n_p n_k G^2 \kappa E \left(\frac{\Delta E}{E} \right)^2 \Psi(E, t) f_p^2 f_k^2 \sum_{n=n_1}^{n_2} n \sin^2 \theta_p \sin^2 \theta_k. \end{aligned} \quad (31)$$

2) *Выражение для мощности теплового шума.* На входе усилителя с температурой шума T_n и окружающей температурой T спектральная плотность мощности теплового шума будет

$$\frac{dP_T}{df} = k(T + T_n) [\text{Вт/Гц}], \quad (32)$$

где k — постоянная Больцмана. Тогда тепловой шум в полосе Шоттки будет $P_T = k(T + T_n)f_0$ и на кикере после усилителя и режекторного фильтра составит

$$P_{Tk} = k(T + T_n) f_0 G_{\text{amp}}^2 \sum_{n=n_1}^{n_2} |H(nf_0')|^2. \quad (33)$$

Окончательно, используя (23) и передаточную функцию режекторного фильтра, запишем некогерентный член, обусловленный тепловым шумом, в следующем виде:

$$\begin{aligned} D_T(E) &= \frac{1}{2} f_0' \langle (\Delta E_{ic}^b)^2 \rangle = \\ &= 2 \left(\frac{Qe}{A} \right)^2 f_0^2 Z_0 k(T + T_n) n_k G_{\text{amp}}^2 \kappa^2 f_k^2 \left(\frac{\Delta E}{E} \right)^2 \sum_{n=n_1}^{n_2} n \sin^2 \theta_k. \end{aligned} \quad (34)$$

2.3. Результаты моделирования. Подставив полученные выражения для когерентного и некогерентного членов в уравнение Фоккера–Планка и решив его, можно получить зависимость функции распределения и разброса по импульсам от времени.

Результаты моделирования для пучков протонов приведены на рис. 3, для пучка ионов углерода C_{12}^{6+} — на рис. 4.

Проведенное моделирование процесса охлаждения с использованием характеристик элементов системы показывает, что эффект охлаждения будет заметен для пучка протонов и отчетливо виден в случае пучка ионов углерода. Различный эффект охлаждения связан с различием зарядности протонов и ионов углерода. Чем больше заряд иона, тем эффективнее охлаждение, так как напряжение, индуцируемое на пикапе, пропорционально заряду частиц и большая зарядность сильно улучшает отношение сигнал/шум.

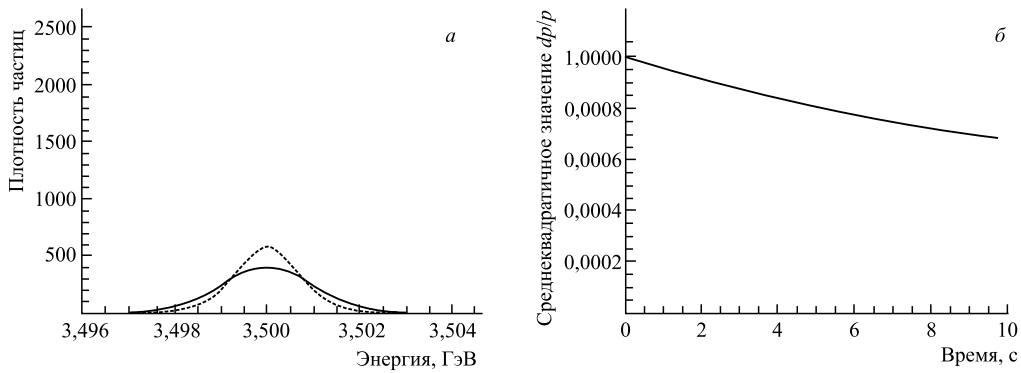


Рис. 3. Эволюции функции распределения (а) и импульсного разброса (б) при охлаждении пучка протонов. Время охлаждения 10 с

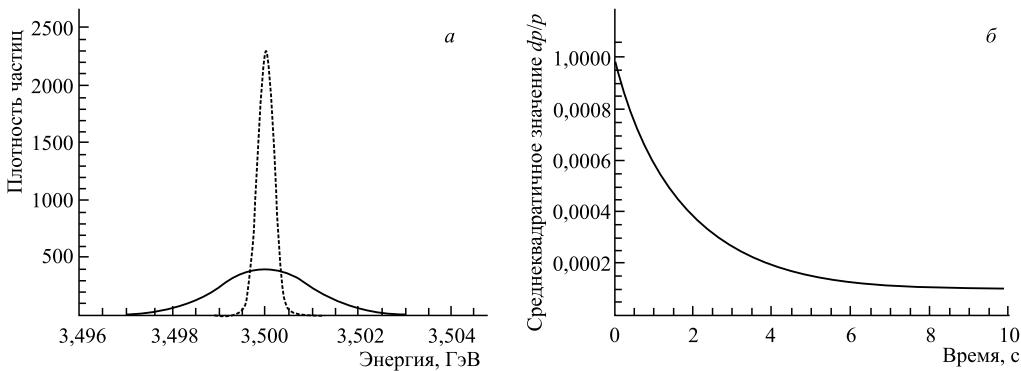


Рис. 4. Эволюции функции распределения (а) и импульсного разброса (б) при охлаждении пучка ионов углерода C_{12}^{6+} . Время охлаждения 10 с

Моделирование дает следующие требования для системы охлаждения: в случае протонного распущенного пучка необходимая мощность для выполнения эксперимента находится в пределах 30–40 Вт и усиление сигнала составляет приблизительно 140 дБ. Если будет использоваться пучок ионов углерода (C^{6+}), то требования к необходимым мощности и усилению понижаются до 10 Вт и 130 дБ соответственно.

3. ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Полная схема системы охлаждения для нуклотрона выглядит, как показано на рис. 5. Ток пучка наводит напряжение на электродах пикапа, формируя первоначальный сигнал в электротехнической линии. В качестве пикапа и кикера (рис. 6) планируется использовать кольцевые электроды, изначально разработанные в исследовательском центре Юлих как прототип для будущего накопителя HESR [10]. Пикап и кикер будут иметь идентичный дизайн: это сборка из 16 колец с апертурой 90 мм и с восемью золотыми электродами на каждом.

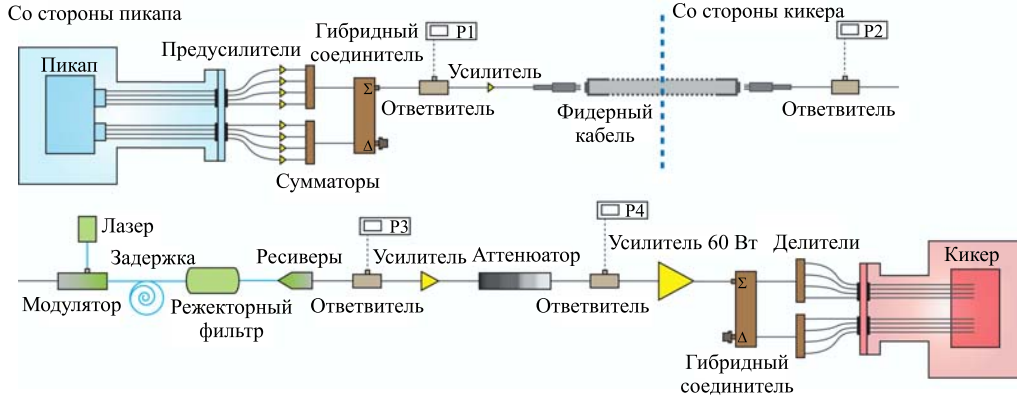


Рис. 5. Схема системы стохастического охлаждения для нуклотрона

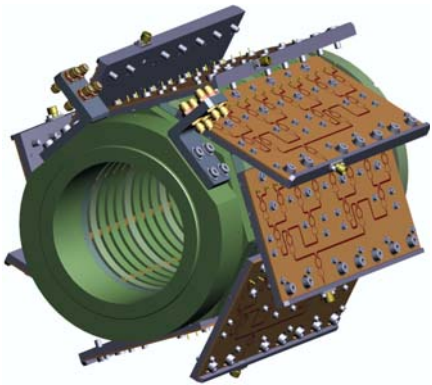


Рис. 6. Структура пикапа/кикера

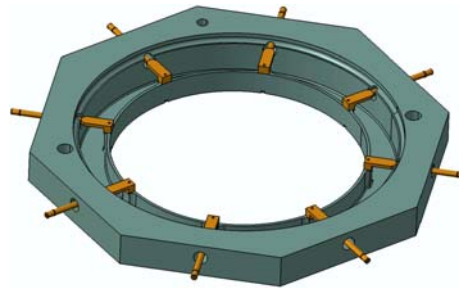


Рис. 7. Одно из 16 колец пикапа

Каждое кольцо структуры имеет восемь короткозамкнутых электродов (рис. 7). Сигнал с разных колец собирается соединительными платами, которые имеют точно настроенные задержки для разных колец, чтобы сигнал в плате распространялся синхронно с пучком. Таким образом, структура имеет, соответственно, восемь выходов, которые затем можно произвольно комбинировать. Модульный дизайн такой структуры позволяет легко изменять количество колец, что вместе с очень хорошим полным продольным импедансом связи делает выбор этого устройства удачным не только для нуклотрона, но также и для коллайдера NICA. Пикап размещен в холодной секции кольца (третья прямолинейная секция) в специальном разработанном для этого криостате для обеспечения оптимальных условий работы (стабильность, чувствительность, уменьшение шума). Участок вакуумной камеры с криостатом уже изготовлен и установлен на кольцо нуклотрона.

Восемь выходных сигналов с соединительных плат с использованием специального кабеля выводятся из криостата через два фланца. Кикер же размещен в специально созданном вакуумном контейнере и расположен в теплом участке кольца нуклотрона (седьмая прямолинейная секция).

Сразу после вывода сигнала из криостата на каждом из восьми выходов будет установлен предусилитель. Далее сигналы можно комбинировать для продольного или поперечного охлаждения. В первую очередь предполагается исследовать охлаждение продольной степени свободы по методу режекторного фильтра. Для этого необходимо, чтобы сигнал был пропорционален полному току. Поэтому после предусилителей восемь сигналов объединяются в один с помощью СВЧ-сумматоров и гибридного соединителя (рис. 5).

Для диагностики радиотехнической линии и наблюдения эффекта охлаждения в схему на разных участках включены ответвители, которые отделяют от основного сигнала небольшую его часть для измерений с помощью сетевого анализатора. К первому ответвителю будет стационарно подключен анализатор спектра для наблюдения дробового шума пучка (шоттки-шума), по которому и оценивается эффект охлаждения.

После ответвителя сигнал еще раз усиливается и с помощью длинного фидерного кабеля с очень малой задержкой и коэффициентом потерь (7 дБ/м) направляется к противоположной точке кольца нуклотрона.

Для продольного охлаждения методом режекторного фильтра необходимо, чтобы в полосе работы системы «зарубки» фильтра (подавление основных гармоник) были как можно глубже, а их следование было как можно более равномерным. Режекторные фильтры с коаксиальной линией задержки весьма плохо соответствуют этим требованиям. Криостатирование же линии связано с большими дополнительными трудностями и затратами. Поэтому наиболее оптимальным выбором является режекторный фильтр с оптической линией задержки [11]. В сотрудничестве с центром Юлих была разработана схема такого оптического режекторного фильтра (правая часть на рис. 8). Принцип его работы следующий: луч лазера модулируется входным ВЧ-сигналом с пикапа. Затем делится пополам делителем, в одном из плеч установлена задержка в полпериода обращения и прецизионная переменная задержка (0–330 пс) для более тонкой подстройки. Далее оптический сигнал в каждом плече преобразуется обратно в электрический с помощью ресиверов. Полученные сигналы вычитаются с инверсией фазы гибридным соединителем.

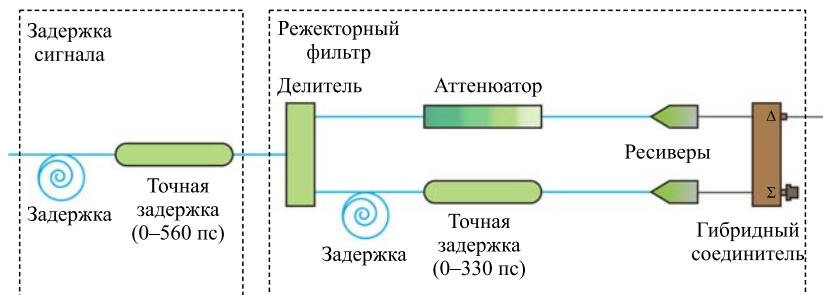


Рис. 8. Схема оптических задержки и режекторного фильтра

Использование оптоэлектроники дает возможность попробовать реализовать линию задержки системы, основанную на оптоволоконных сборках. Это имеет ряд преимуществ по сравнению с коаксиальной задержкой: размеры получаются гораздо компактнее, а настройка становится очень точной и простой. Такая задержка состоит из набора оптоволоконных кабелей разной длины, обеспечивающих необходимую задержку сиг-

нала. Для точной подстройки задержки используется прецизионная задержка в диапазоне 0–320 пс, аналогичная используемой в режекторном фильтре. Схема такой линии задержки показана в левой части рис. 8.

После режекторного фильтра сигнал еще раз усиливается. Подстройка усиления всей системы осуществляется следующим далее переменным аттенуатором, после которого сигнал попадает в основной мощный усилитель на 60 Вт. Затем с помощью гибридного соединителя и делителей сигнал коррекции разделяется на восемь частей и, наконец, создает напряжение на пластинах кикера, которое корректирует разброс пучка по импульсу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данный эксперимент необходим для проектирования и создания системы стохастического охлаждения для коллайдера NICA. В ходе эксперимента предстоит создать, оценить общую эффективность и экспериментально сравнить разные методы стохастического охлаждения на нуклотроне. Схема системы создавалась с участием специалистов из ЦЕРН и научного центра Юлих. Моделирование процесса стохастического охлаждения с использованием реальных характеристик компонент системы показывает, что эффект охлаждения пучка на нуклотроне будет возможно вполне уверенно наблюдать. Поэтому в целом выработанная схема системы охлаждения выглядит работоспособной.

Статус создания системы стохастического охлаждения для нуклотрона следующий: изготовлены и установлены на кольцо ускорителя участки вакуумной камеры и криостат, пикап и кикер, заказано и получено практически все оборудование, необходимое для проведения эксперимента (широкополосные усилители, кабельные сборки с малым коэффициентом потерь, измерительное оборудование, оптоэлектроника и проч.). Ближайший этап — сборка и настройка оптических notch-фильтра и линии задержки и после испытаний размещение оставшегося оборудования в туннеле кольца ускорителя с возможностью удаленных измерений и управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nuclotron-Based Ion Collider Facility. <http://nica.jinr.ru/>
2. Mohl D. Stochastic Cooling. CERN, 1995.
3. Smirnov A. A., Kovalenko A. D. Nuclotron — Superconducting Accelerator of Nuclei at LHE JINR (Creation, Operation, Development) // Part. Nucl., Lett. 2004. V. 1, No. 6(123). P. 11–40.
4. Butenko A. et al. Status of the Nuclotron. «Nuclotron-M» Project // Proc. of IPAC'10, Kyoto, Japan, 2010. P. 684.
5. Mohl D. et al. // Phys. Rep. 1980. V. 58. P. 76.
6. Goldberg D., Lambertson G. Dynamic Devices: A Primer on Pickups and Kickers. 1991.
7. Neuffer D. Calculations of Pickups/Kickers Sensitivity. Fermilab, 1982.
8. Katayama T., Tokuda N. Fokker–Planck Approach for the Stochastic Momentum Cooling with a Notch Filter // Part. Accel. 1987. V. 21. P. 99.
9. Katayama T. Memo for Fokker–Planck Equation. 2007. Unpublished.
10. Recent Developments for the HESR Stochastic Cooling System // Proc. of COOL, Bad Kreuznach, Germany, 2007. P. 191.
11. Optical Notch Filter for the Stochastic Cooling System of COSY. PAC. New York, 1999.