

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ИОН-ИОННЫХ КОЛЛАЙДЕРОВ

В. В. Пархомчук¹, В. Б. Рева

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

На базе результатов экспериментов по охлаждению ионных пучков в установках CSRe и COSY обсуждаются возможные параметры ионных коллайдеров с электронным охлаждением. Большое значение для успешной работы электронного охладителя имеет его конструкция и возможность оперативного управления параметрами электронного пучка.

Based on results of electron cooling experiments in storage ring CSRe and COSY possible parameters of ion colliders with electron beam cooling are discussed. Its design and possibility of on-line adjustment of the parameters of electron beam are very important for successful operation of electron cooling.

PACS: 29.20.db; 29.27.Fh

ВВЕДЕНИЕ

Ядерная физика и физика элементарных частиц основаны на изучении взаимодействия частиц после ускорения до больших энергий. При этом качество экспериментов во многом определяется качеством пучков: интенсивностью, эмиттансом и разбросом импульсов. Системы охлаждения позволяют заметно улучшить светимость в экспериментах.

1. ОСНОВЫ ЗАМАГНИЧЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

В электронных охладителях электронный пучок после ускорения имеет очень маленький энергетический разброс. В секции охлаждения электроны имеют только поперечный разброс скоростей. В сопутствующей системе это выглядит как газ ларморовских кружков, практически не имеющих скоростей вдоль магнитного поля B . Радиус вращения, как правило, мал по сравнению с максимальным прицельным параметром $\rho_{\max} = V \times \tau_{\text{flight}}$, определяемым длиной пролета иона за время нахождения в электронном пучке: $\rho_L = \frac{mV_{e\perp}c}{eB} \ll \rho_{\max}$. В сопутствующей системе координат $\tau_{\text{flight}} = l_{\text{cool}}/(c\beta\gamma)$, где l_{cool} — длина участка охлаждения; c — скорость света; β, γ — лоренцовские параметры энергии электронов $\gamma = 1 + E_e/(m_e c^2)$, $\beta = \sqrt{1 - 1/\gamma^2}$.

¹E-mail: parkhomchuk@inp.nsk.su

Минимальный прицельный параметр ограничивает обмен энергиями при малых скоростях ионов: $\rho_{\min} = e^2 Z / (mV^2)$. Теплообмен между горячими ионами и холодными (медленно движущимися) ларморовскими кружками становится замагниченным при двух условиях: во-первых, $\rho_L \ll \rho_{\max}$, во-вторых, за время пролета должно совершаться много оборотов в магнитном поле $\tau_{\text{flight}} \times \omega_L \gg 1$, $\omega_L = eB / (m_e c)$. Из этих условий видно, что замагниченность электронов при электронном охлаждении определяется не только величиной магнитного поля B , но и длиной участка охлаждения l_{cool} . В этих условиях значение силы трения определяет эмпирическое выражение для силы трения [3]:

$$\mathbf{F} = -\frac{4n_e e^4 Z^2 \mathbf{V}}{m_e (V^2 + V_{\text{eff}}^2)^{3/2}} \ln \left(\frac{\rho_{\max} + \rho_L + \rho_{\min}}{\rho_L + \rho_{\min}} \right),$$

где eZ — заряд иона, движущегося в электронном газе с плотностью n_e ; V_{eff} — величина, характеризующая скорость ларморовских кружков. В идеальном случае это дрейфовая скорость в скрещенном магнитном B и электрическом E_{\perp} полях пространственного заряда пучка электронов $V_d = c \times (2\pi e n_e x) / B$, x — отклонение от центра электронного пучка.

2. ОХЛАДИТЕЛЬ COSY

ИЯФ построил (сравнительно недавно) два высоковольтных электронных охладителя — в Китае CSRe (300 кВ) и в Германии COSY (2000 кВ). Проиллюстрируем работу системы электронного охлаждения результатами, полученными на этих установках. Первые попытки охлаждения в COSY проводились при энергии электронов около 25 кэВ, это соответствует энергии инжекции протонов 50 МэВ. При включении электронного пучка протонный пучок вымирал очень быстро и найти охлаждение не удавалось. Это было проявление «электронного нагрева» вместо охлаждения. Мы не стали более подробно исследовать это явление, а перешли к экспериментам, проводимым при более высокой энергии.

При энергии протонов 200 МэВ охлаждение было достаточно эффективным и быстро достигалось равновесие между внутривидовым рассеянием (IBS) и охлаждением (рис. 1). При выключении электронного пучка протонный пучок быстро расширялся из-за внутривидового рассеяния (IBS). Но на начальном этапе охлаждения заметная часть пучка

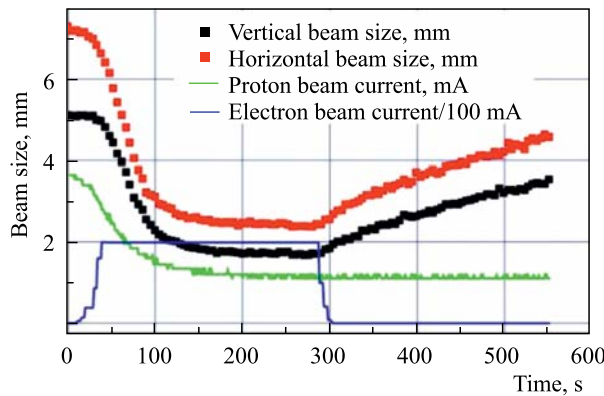


Рис. 1. Охлаждение протонного пучка при энергии 200 МэВ в COSY

терялась. При целенаправленном понижении интенсивности протонного пучка можно было добиться полного охлаждения без заметных потерь. При промежуточном значении интенсивности наблюдались периодические колебания между охлаждением и нагревом с расширением протонного пучка. Особенно красиво это выглядело в вариациях шоттки-спектра протонного пучка (рис. 2). На рисунке видно, что после выключения электронного пучка (в верхней части рисунка) спектр расширился и колебания исчезли. При дальнейшем повышении энергии паразитные колебания заметно уменьшались.

Максимальная энергия протонного пучка, при которой проводилось электронное охлаждение, составляла 1,66 ГэВ. Именно при этой энергии была настроена система стохастического охлаждения COSY, а также можно было продемонстрировать совместное охлаждение. Первые 500 с работало стохастическое охлаждение, а затем вместо стохастического охлаждения включалось электронное охлаждение (рис. 3).

Моделирующая кривая (fit) рассчитывалась в предположении, что время стохастического охлаждения составляет 350 с, а время электронного охлаждения для малых амплитуд — 120 с. Значение времени охлаждения 120 с очень близко к ожидаемым значениям времени охлаждения протонного пучка, получаемым из уравнения для силы

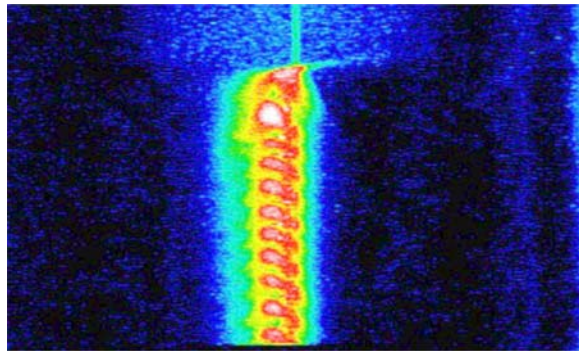


Рис. 2. Вариации шоттки-спектра пучка в колебательном режиме охлаждения

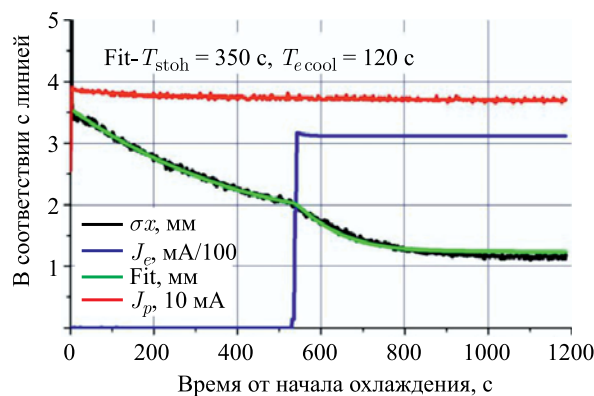


Рис. 3. Первоначальное охлаждение пучка системой стохастического охлаждения и последующее введение электронного тока

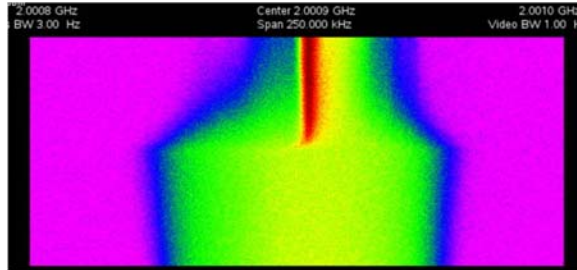


Рис. 4. Шоттки-спектр колебаний в протонном пучке охлаждения (время идет вверх)

трения с амплитудой колебаний протонов 2 мм. При испытаниях без включения стохастического охлаждения начальное время электронного охлаждения составило 2000 с, а близкие к равновесию амплитуды 2–1 мм тоже затухали за 100–120 с. Столь сильный спад скорости охлаждения был заметно больше ожидаемого значения при кубическом спаде $(4,5/2)^3 \cdot 120 = 640$ с. Наверно, это дополнительный сигнал о необходимости квадрупольной компенсации вращения электронов на краях электронного пучка.

Одновременно с измерением поперечного профиля (см. рис. 3) измерялась динамика изменения разброса продольных импульсов протонов по спектру Шоттки (рис. 4). Система стохастического охлаждения имела только два канала и могла охлаждать только x , y -профили, а разброс продольных импульсов медленно нарастал. Включение электронного охлаждения существенно сжало и разброс импульсов.

3. ОХЛАДИТЕЛЬ CSRe

Электронный охладитель для китайского накопительного кольца CSRe выполнен по схеме с двумя отдельно размещенными большими соленоидами вокруг пушки и коллектором с центральным баком для высоковольтной системы. Такая схема позволяет заметно сократить число поворотов электронного пучка, что упрощает оптику пучка и позволяет легко получать большие электронные токи до 3 А. Довольно успешно были охлаждены многие экзотические ионы. На рис. 5 показано сжатие разброса импульсов в углеродном пучке. Из рисунка видно, что разброс импульсов существенно уменьшается с $2 \cdot 10^{-4}$ до 10^{-5} .

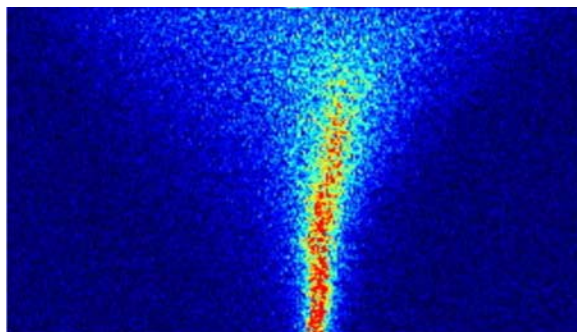


Рис. 5. Охлаждение углеродного пучка $^{12}\text{C}^{+6}$ с энергией 400 МэВ/нуклон и электронным током 1 А

4. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ НОВЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Успешный запуск высоковольтных электронных охладителей ИЯФ для CSRe и COSY был обеспечен несколькими важными изобретениями, внесенными в их конструкцию. Эти усовершенствования обсуждались на специализированных совещаниях по COOL. Совсем в «телеграфном виде» просто перечислим их.

4.1. Электронная пушка. Созданная четырехсекторная модуляция электронного пучка позволяет с высокой точностью проследить относительные движения отдельных фрагментов в электронном пучке (рис. 6), что оказалось принципиально важно для настройки магнитной оптики, обеспечивающей минимизацию поперечного движения в секции охлаждения. Это позволило получить большое количество информации о деформации электронного пучка в процессе движения вдоль магнитной системы, определить влияние ионов по вращению электронного пучка.



Рис. 6. Четырехсекторная электронная пушка

4.2. Коллектор. Фильтр Вина перед коллектором электронов, полностью поглощающий обратный электронный поток, отраженный от коллектора, позволил существенно уменьшить радиационный уровень, создаваемый электронами с энергией 1 МэВ и выше.

4.3. Компас. Компас способен работать в вакууме и позволяет измерить, а затем и откорректировать прямолинейность магнитной линии вдоль секции охлаждения в рабочем состоянии системы охлаждения.

4.4. Каскадный трансформатор. Каскадный трансформатор обеспечил электрической энергией все 33 секции вдоль ускоряющих трубок. Катушки вокруг ускоряющей и замедляющей трубки создавали магнитное поле 500 Гс. В каждой секции работали высоковольтные источники питания с напряжением в диапазоне +30 и –30 кВ, так что разность напряжений между секциями составила 60 кВ.

5. ВОЗМОЖНОЕ РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Кроме перечисленных в разд. 4 достижений были выяснены трудности при настройке охлаждения. Уже на установке электронного охлаждения COSY сильная нагрузка каскадного трансформатора ограничивала предельно получаемый электронный ток 1 А. Для DC-систем электронного охлаждения для охлаждения тяжелых ионов остается востребованным вариант с замагниченным электронным пучком и большим электронным током. В такой системе можно иметь достаточно большую температуру электронов для подавления сильной рекомбинации, при этом охлаждающая способность электронного пучка утрачивается не слишком сильно.

Решение с каскадным трансформатором вполне работает до энергии 2 МэВ. Проблема в том, что мы должны через первые кольца трансформатора передавать всю необходимую мощность. Одним из способов решить эту проблему является использование турбогенераторов, работающих за счет сжатого газа. Такой вариант ИЯФ пытается развивать в кооперации с группой ученых из Университета Майнца [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перспективы развития работ по ядерной физике с использованием ион-ионных и ион-электронных столкновений остаются достаточно актуальными. Примером является проект NICA в ОИЯИ. Высокие требования к качеству ионных пучков могут быть достигнуты с использованием систем охлаждения пучков.

Исследование электронной пушки с управляемым профилем (п. 4.1) выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00080).

Благодарности. В этом обзорном докладе мы использовали результаты работы, полученные большим коллективом сотрудников институтов: ИЯФ (Новосибирск), ОИЯИ (Дубна), FZK (Юлих) и IMP. Авторы благодарны сотрудникам этих институтов за творческий вклад в развитие электронного охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будкер Г. И. // АЭ. 1967. Т. 22. С. 346.
2. Derbenev Ya., Skrinsky A. // Part. Accel. 1977. V. 8. P. 1.
3. Дербенев Я., Скринский А. // Физика плазмы. 1978. Т. 4. С. 492.
4. Parkhotchuk V. // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 44. P. 9–17.
5. Пархомчук В. В., Скринский А. Н. Электронное охлаждение: 35 лет развития // УФН. 2000. Т. 170, № 5. С. 473–493.
6. Kamerzhiev V. et al. 2 MeV Electron Cooler for COSY and HESR — First Results // Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany, 2014; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/mopri075.pdf>.
7. Hofmann A. et al. Turbo Generators for Powering the HV-Solenoids at the HESR Electron Cooler // Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany, 2014; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/mopme051.pdf>.