

ЭЛЕКТРОННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ И НАКОПЛЕНИЕ БОЛЬШИХ ТОКОВ В ТЯЖЕЛОИОННЫХ СИНХРОТРОНАХ

В.В.Пархомчук

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера, Новосибирск

Использование электронного охлаждения открывает перспективы получения больших интенсивностей в пучках тяжелых ионов. Для этого при достаточно большой энергии, где влияние пространственного заряда самого пучка уменьшается, проводится накопление пучка с использованием электронного охлаждения. Этот путь открывает возможности повышения фазовой плотности пучков на много порядков. Такие ионные сгустки могут оказаться интересными для инерционного термояда и других применений, где нужны сверхбольшие импульсные мощности.

Electron Cooling and Accumulation of High Current in Heavy-Ion Synchrotrons

V. V. Parkhomchuk

Using of electron cooling opens a great perspective for getting high intensities in heavy ion beams. For this reason the beam storage with electron cooling is carried out at the large enough energy when influence of the beam space charge deminishes. This way opens possibilities to increase the pulse density of the beam by many orders. These ion bunches can be increasing for the inertial thermonuclear power and other applications, where one needs for super high pulse power.

1. Принципы накопления ионных пучков

В настоящее время источниками тяжелых ионов с высокой энергией являются циклотроны и линейные ускорители. Ионный пучок из таких ускорителей обладает, как правило, малым эмиттансом и достаточно большой длительностью импульса ионного тока, например 1 мс. Для получения энергии до 100 МэВ/н синхротрон должен иметь периметр около 100 м; период обращения в таком синхротроне около 0,7 мкс. Это означает, что при длительности импульса тока 1 мс возможно накопление в таком синхротроне около 1000 оборотов пучка, правда, при этом и эмиттанс соответственно возрастет как минимум в 1000 раз при 100%-м захвате всех частиц. Для некоторых ионов возможно использование перезарядной инжекции, при которой нарастание эмиттанса заметно меньше. Например, ионы H^- или H_2^+ , проходя

тонкую мишень, легко превращаются в ионы H^+ . Использование такой инжекции для ионов высокой зарядности затрудняется быстрым падением сечения ионизации и ростом сечения рассеяния и потерь.

После такой многооборотной инжекции апертура накопителя оказывается целиком заполненной ионным пучком. Необходимо охладить ионный пучок и существенно уменьшить его размеры, освободив место для новой инжекции. Время электронного охлаждения горячего ионного пучка составляет

$$\tau \approx \frac{(\Delta p_{\perp}/p)^3 \gamma^5 \beta^3}{4r_e r_i \langle n_e \rangle c L_c}, \quad (1)$$

где $\Delta p_{\perp}/p$ – относительный разброс импульсов, $\beta = v/c$, $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$, $r_e = e^2/mc^2$, $r_i = (Ze)^2/Mc^2$ – классические радиусы электрона и иона, $\langle n_e \rangle = \eta n_e$ – средняя по орбите плотность электронного пучка, $\eta = l/C$ – отношение длины электронного охладителя к периметру орбиты, L_c – кулоновский логарифм столкновений. Значение предельной плотности электронного пучка ограничивается пространственным зарядом электронов. Поперечное электрическое поле вызывает дрейф электронного пучка, и, когда скорость этого дрейфа сравнивается со скоростями ионов в сопутствующей системе, охлаждение становится неэффективным:

$$n_{e\max} = \frac{B\gamma^2\beta}{2\pi e\beta_c}, \quad (2)$$

где B – продольное магнитное поле, фокусирующее электронный пучок, e – заряд электрона, β_c – значение бета-функции накопителя в охладителе. В результате время охлаждения ионного пучка составит

$$\tau \approx \frac{\pi\beta_c(\Delta p_{\perp}/p)^3\gamma^3\beta^2}{2r_e r_i (B/e)\eta c L_c}. \quad (3)$$

После охлаждения ионного пучка инжекцию можно повторить, добавив новую порцию ионов. Фактор накопления определяется отношением времени жизни к периоду инжекций. Период инжекций должен быть больше времени охлаждения для того, чтобы не терять частицы при новой инжекции. Наиболее принципиальный источник потерь тяжелых ионов при электронном охлаждении – это рекомбинация ионов с охлаждающими электронами. Коэффициент радиационной рекомбинации иона с зарядом Z , без учета внутренней электронной оболочки, равен

$$\alpha_{\text{rec}} = 3,02 \cdot 10^{-13} \frac{Z^2}{\sqrt{T}} \left(\ln\left(\frac{11,32Z}{\sqrt{T}}\right) + 0,14\left(\frac{T}{Z^2}\right)^{1/3} \right) \text{см}^3/\text{с}, \quad (4)$$

где T (эВ) – температура электронного пучка. Учитывая только радиационную рекомбинацию, получим фактор накопления ионного тока

$$N_{\text{stor}} = \frac{\gamma^2}{\alpha_{\text{rec}} \langle n_e \rangle \tau} \approx \sqrt{T} \frac{1,6 \cdot 10^{-5}}{A(\Delta p_{\perp}/p)^3 \gamma^3 \beta^3}. \quad (5)$$

Видно, что предельное число частиц, накопленное в пучке, $N_{\text{stor}} \times N_{\text{inj}}$, не зависит от плотности электронного пучка. Плотность электронного пучка определяет только

скорость накопления N_{inj}/τ , но не предельно достижимую интенсивность из-за того, что увеличение скорости накопления компенсируется одновременным увеличением скорости потерь. Очень существенным фактором, определяющим возможности накопления, является начальный разброс в ионном пучке. При уменьшении в 10 раз этого разброса фактор накопления увеличивается в 1000 раз. Но собственный пространственный заряд ионного пучка ограничивает возможности для слишком сильного уменьшения начального эмиттанса $\epsilon = \beta_c(\Delta p/p)^2$. Максимально возможное число частиц в таком пучке ограничено значением сдвига частоты бетатронных колебаний $\Delta\nu_{max} < 0,1 \div 0,2$:

$$N_{max} = \frac{4\pi\Delta\nu\epsilon_{stor}\gamma^3\beta^2}{r_i}, \quad (6)$$

где ϵ_{stor} – эмиттанс накопленного пучка. Наиболее естественный путь накопления – это охлаждение ионов трубчатым электронным пучком с отсутствием электронов внутри радиуса a_{stor} . Тогда ионный пучок будет охлаждаться до размера примерно a_{stor} и при этом скорость рекомбинации будет заметно меньше в охлажденном пучке.

2. Эксперименты по накоплению ионных пучков на синхротроне SIS

В 1998 г. на синхротроне тяжелых ионов SIS в Дармштадте (GSI) заработала установка для электронного охлаждения, разработанная и построенная в ИЯФ. После ускорения ионов в линейном ускорителе до энергии примерно 11 МэВ/н и дополнительной обдирки ионов на перезарядной мишени они с помощью многооборотной инжекции заполняют весь допустимый акцептанс синхротрона SIS. Для многих сортов ионов трудно получить большой ионный ток, что ограничивало интенсивность ускоренного пучка. Электронное охлаждение, сжимая ионный пучок до малого размера, позволяет производить многократную инжекцию в освобождающийся после охлаждения фазовый объем, увеличивая тем самым накопленную интенсивность ионного пучка.

Общий вид установки показан на рис. 1, а на рис. 3 показан пример накопления ионов висмута в синхротроне SIS.

Как видно из рис. 3, потери ионов между циклами инжекции возрастают по мере накопления и максимальная интенсивность достигается при равенстве потерь между инжекциями вновь впускаемому току. В потерях доминируют перезарядка ионов на остаточном газе и рекомбинация на электронном пучке. В экспериментах были обнаружены сильные изменения коэффициента рекомбинации от значения остаточного заряда ионов висмута $Bi^{(+62-+68)}$ (рис. 2), аналогичные ранее наблюдавшимся для ионов свинца в CERN.

При измерениях, показанных на рис. 2, охлаждение проводилось при расширении пучка по плотности в 3 раза и, соответственно, температура пучка с 0,09 эВ до расширения падала до 0,03 эВ. Видно, что скорость рекомбинации для некоторых частично ионизованных ионов близка радиационной, но есть и ионы с заметно более сильной рекомбинацией. Исследования, проведенные в [5] на установке TSR, показали, что причиной быстрой рекомбинации некоторых ионов является диэлектрон-

ная безызлучательная рекомбинация, когда электрон пучка захватывается ионом и энергия передается внутреннему электрону, который переходит в возбужденное состояние. Если спектр такого взаимодействия имеет максимум вблизи малой энергии относительного движения, это приводит к повышенной рекомбинации таких ионов.

Параметры установки электронного охлаждения синхротрона SIS

Энергия электронного пучка	6,3 кэВ
Ток электронного пучка	0,3-1 А
Диаметр катода	25 мм
Магнитное поле на катоде	0,5-4 кГс
Магнитное поле на уч. охлаждения	0,5-1,5 кГс
Коэффициент магнитного расширения пучка	1-8
Диаметр электронного пучка на участке охл.	25-70 мм
Длина участка охлаждения	3 м
Параллельность поля в соленоиде	$5 \cdot 10^{-5}$
Вакуум в установке	$4 \cdot 10^{-11}$ мм рт.ст.

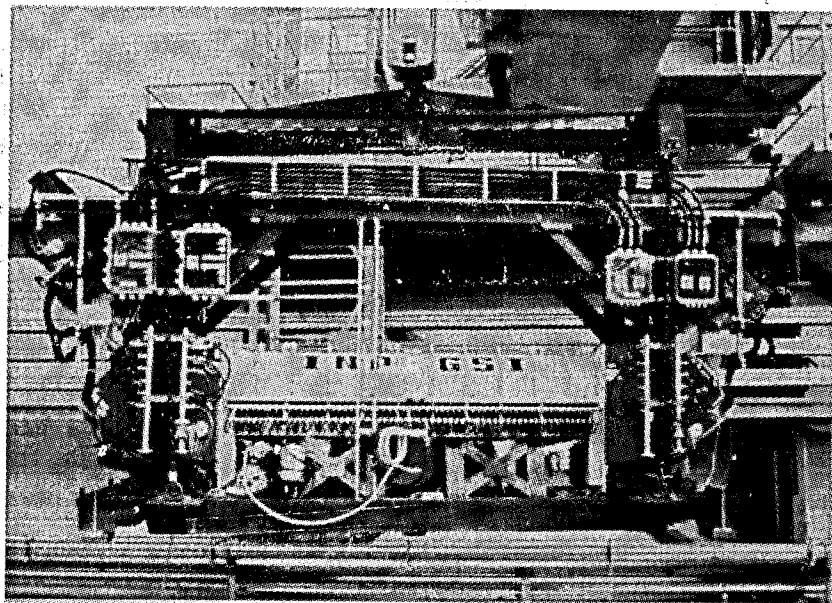


Рис. 1. Установка для электронного охлаждения в процессе перемещения на синхротрон SIS

Для условий эксперимента по накоплению в SIS ионов Bi_{209}^{+67} температура $T = 0,03$ эВ, $\epsilon = 150\pi$ мм · мрад, фактор накопления, определяемый уравнением (5), равен $N_{\text{stor}} = 20$, что близко к реально полученным в экспериментах значениям.

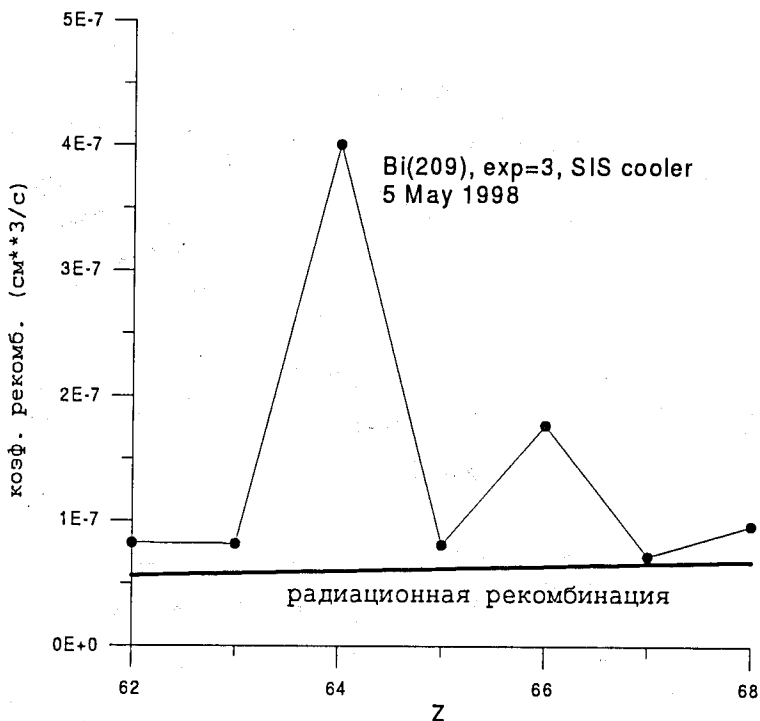


Рис. 2. Коэффициент радиационной рекомбинации ионов висмута с разными зарядами. Линия для радиационной рекомбинации проведена для эффективной температуры $T = 0,03$ эВ.

Как уже упоминалось выше, использование полого электронного пучка может существенно уменьшить рекомбинацию и, соответственно, увеличить накопленный ионный ток.

3. Вариант накопления ионных пучков для обжаривания термоядерных таблеток

Изучение проблем обжаривания маленьких термоядерных мишеней тяжелоионными пучками [3] показало, что необходимы энергии ионов 6–10 ГэВ с мощностью 300–500 ТВт, энергозапасом 3–5 МДж и длительностью токового импульса 10 нс с током 50 кА. Для ионов висмута массой 209 это соответствует энергии 50 МэВ/н, скорости движения 10^{10} см/с ($\gamma = 1,053$, $\beta = 0,31$) и длине сгустков 1 м.

Один из сценариев создания таких пучков – накопление в длинном, порядка 1 км, кольце ионного пучка с током 1 А и малой зарядностью Z_{ini} и затем сильное сжатие ионов со всего периметра в метровый сгусток, что даст эквивалентный

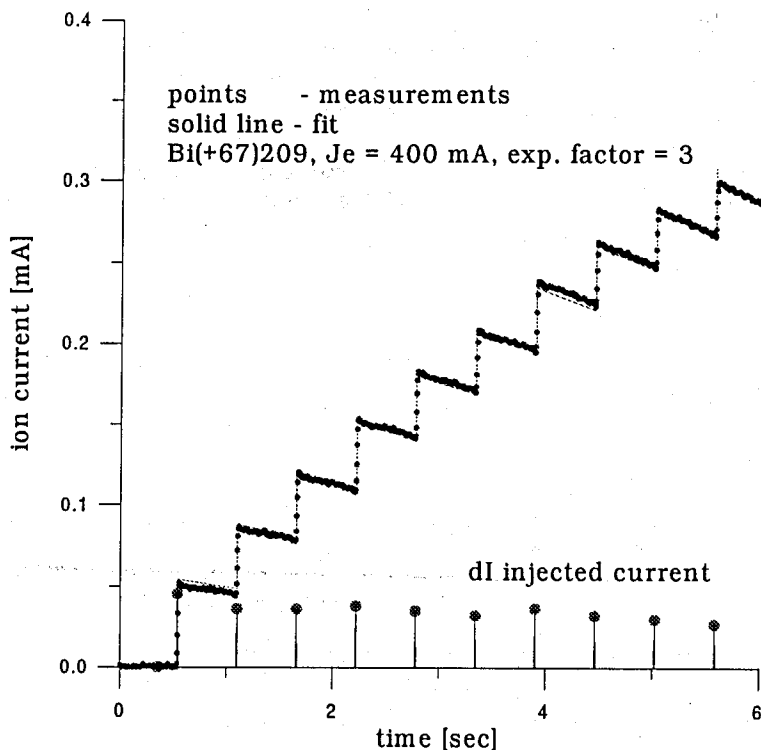


Рис. 3. Накопление ионов Bi^{+67} на синхротроне SIS

ток $Z/Z_{\text{ini}} \times 1$ кА. Предельное число частиц в накопителе, определяемое (6), обратно пропорционально квадрату заряда ионов в пучке Z_{ini} . Из этого ясна привлекательность идеи малой начальной зарядности Z_{ini} , приводящая к увеличению числа частиц в накопителе. Но при этом нужно помнить, что при заданном магнитном поле B в дипольных магнитах длина накопителя увеличивается обратно пропорционально Z_{ini} , $R = Mc^2\beta\gamma/(eZ_{\text{ini}}B)$, что приводит к уменьшению среднего тока $eN_{\text{max}}/(2\pi R)$. Поэтому вариант создания из тех же магнитов нескольких накопителей с малым периметром не требует дополнительных затрат, но позволяет использовать для накопления электронное охлаждение, сильно понижающее требования на инжекционный ускоритель ионов. Для определенности рассмотрим численный вариант такого накопителя на ионах Bi^{+83}_{209} . Радиус в поворотных магнитах должен составлять $R = 1,3$ м при поле $B = 20$ кГс. Периметр такого накопителя при коэффициенте заполнения магнитами 0,5 составит 16 м. При эмиттансе накопленного пучка 400π мм · мрад число частиц в пучке составит $N_{\text{max}} = 10^{13}$ и энергозапас ионного пучка составит 17 кДж. При удачных экспериментах с одним таким коль-

цом создание установки со многими пучками на несколько мегаджоулей не будет слишком сложной задачей.

4. Заключение

Большое число построенных и проекты создания новых накопительных колец для тяжелых ионов с электронным охлаждением во всех развитых странах подчеркивают актуальность такого комплекса в России. Опыт ИЯФ в развитии электронных охладителей для Германии и участие в строительстве комплекса накопительных колец в Китае демонстрируют, что пока еще существует такая возможность. Объединение усилий разных институтов, мечтающих об использовании этой техники: ОИЯИ, ИТЭФ и ИЯФ, — единственный путь сохранить и развивать технику получения сверхмощных ионных пучков с использованием электронного охлаждения.

Литература

1. Г.И.Будкер. Эффективный метод для демпфирования колебаний частиц в протонных и антипротонных кольцах. — Атомная энергия, 1967, т.22, с.346–348.
2. Г.И.Будкер. А.Н.Скринский. Электронное охлаждение и новые перспективы в физике элементарных частиц. — Успехи физических наук, 1978, т.124, с.561.
3. Proposal for a European Study Group, "Heavy ion ignition facility", GSI-95-03, report, April 1995.
4. S. Baird, J. Bosser, C. Carli, M. Chanel, P. Lefevre, R. Ley, R. Madsen, I.N. Meshkov, D. Mohl, G. Molinary, F. Motsch, G. Tranquille. Measurement of lifetime of Pb52+, Pb53+ and Pb54+ beams at 4.2 MeV per nucleon subject to electron cooling. — Phys. Lett., 1995, v.B361, p.184.
5. A. Wolf, G. Gwinner, A.A. Saghiri, M. Schmitt, D. Schwalm, G. Wissler. Recombination in electron coolers. — Report on workshop Electron Cooling 99, Uppsala, Sweden, 1999.
6. M.Steck, K.Blashe, H.Eickhoff, B.Franczak, B.Franzke, L.Groening, T.Winkler, V.A.Dolgashev, V.V.Parkhomchuk. Commissioning of the electron cooling device in the heavy ion synhrotron SIS. — Proc. 6 EPAC98, Stockholm, 1998.