

Опыт ввода в эксплуатацию установки электронного охлаждения на синхротроне SIS

В.И. Куделайнен, В.В. Пархомчук, Б.М. Смирнов

ИЯФ Новосибирск СО РАН, Россия

L.Groening, M.Steck, T.Winkler,

GSI Darmstadt, Germany

В докладе обсуждаются результаты запуска установки электронного охлаждения на синхротроне SIS GSI (Дармштадт, Германия). Полученные скорости накопления ионных пучков и их параметры после охлаждения сравниваются с результатами моделирования. Установка электронного охлаждения увеличила ускоряемые в одном цикле значения ионных токов в десятки раз, что заметно расширило возможности применения тяжелоионного комплекса в GSI.

Установка для охлаждения

В мае 1998 г. на синхротроне тяжелых ионов SIS в Дармштадте (GSI) вступила в эксплуатацию установка для электронного охлаждения, разработанная и построенная в Институте ядерной физики СО РАН [1]. После ускорения в линейном ускорителе до энергии 11 МэВ/нуклон и дополнительной обдирки электронов на перезарядной мишени ионы с помощью многооборотной инжекции заполняют весь допустимый акцептанс (определяемый максимальной амплитудой колебаний в вакуумной камере) синхротрона SIS. Для многих сортов ионов трудно получить большой ионный ток в ионном источнике и линейном ускорителе, что ограничивает интенсивность ускоренного пучка. Электронное охлаждение, сжимая ионный пучок до малого размера, позволяет производить многократную инжекцию в освобождающийся после охлаждения фазовый объем и увеличивать тем самым накопленную интенсивность ионного пучка.

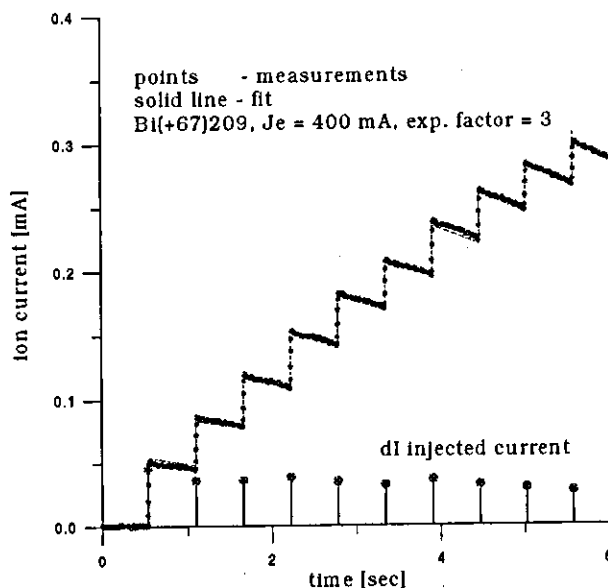
Параметры установки электронного охлаждения синхротрона SIS: энергия электронного пучка — 6,3 кэВ; ток электронного пучка — 0,3–1 А; диаметр катода — 25 мм; магнитное поле на катоде — 0,5–4 кГс; магнитное поле на участке охлаждения — 0,5–1,5 кГс; коэффициент магнитного расширения — 1–8; диаметр электронного пучка — 25–70 мм; длина участка охлаждения — 3 м; параллельность поля в соленоиде — 5×10^{-5} ; вакуум в установке — 4×10^{-11} мм.рт.ст.

Поперечное охлаждение

На рис. 1 приведен пример накопления ионного тока (конкретно ионов Bi_{209}^{+67} с зарядом 67, что означает наличие еще не потерянных 16 электронов на внутренних оболочках) [2]. В начале многооборотной инжекции специальными бамп-магнитами центральная орбита подводится близко к ножу септума так, что в кольце могут обращаться ионы с амплитудой бетатронных колебаний не более a_{in} . Затем медленно (относительно времени обращения) амплитуда искажения орбиты b спадает до нуля, а апертура, открытая для бетатронных колебаний, возрастает до нормальной апертуры синхротрона a_{out} .

Изменяя амплитуду токов в бамп-магнитах, легко управлять значением начальной амплитуды бетатронных колебаний $a_{in} = b_{sept} - b$. При $b = b_{sept}$ центральная орбита касается ножа септума, и для ионов нет свободной зоны для бетатронных колебаний. При этом все предварительно накопленные в ускорителе ионы погибнут. Если же $a_{in} > 0$, то такой бамп не убивает ионы с амплитудами меньше a_{in} , что и позволяет после сжатия ионного пучка электронным охлаждением внутрь этой зоны сохранить их во время следующего цикла, когда центральная орбита опять подойдет к септуму на $a_{in} \ll a_{out}$.

Рис. 1: Сигнал тока пучка ионов в процессе накопления. Маленькие точки — измерения трансформатором тока; линии — подгонка по модели; большие точки — добавки ионного тока в момент инжекции.



На рис. 1 большими круглыми точками показаны величины ионных токов добавляемые в SIS при каждой новой инжекции. Они вычислялись как разность токов до и после инжекции. Первая по времени инжекция — самая большая, так как не сопровождается потерями уже инжектированного тока. Во время следующих инжекций добавляется такая же порция новых ионов, но все ионы, которые не успели охладиться и уйти из фазового пространства, занимаемого новыми частицами, гибнут, и это уменьшает скачок ионного тока. Отношение этих добавок тока к первой инжекции назовем эффективностью охлаждения — это доля охлажденного тока.

Между инжекциями видны потери тока во времени, связанные с рекомбинацией и процессами диффузии при охлаждении. Амплитуда потерь за время между инжекциями подгонялась под формулу $\Delta I = -a_{loss} - b_{loss} \cdot I$, что соответствовало двум процессам. Первый отвечал потерям вновь инжектированного ионного тока (отношение a_{loss}/I_0 показывало потери горячих ионов) во время охлаждения, а второй — потери уже накопленного тока: T/b_{loss} — время жизни уже охлажденного пучка. В результате такой подгонки к измеренной кривой тока мы получали эффективность инжекции, потери тока при охлаждении и время жизни охлажденного пучка при заданных амплитудах бамп-магнита b и периода инжекции T .

Модель охлаждения

Уравнение для бетатронной амплитуды колебаний a запишем в виде

$$\frac{da}{dt} = -\lambda(a)a, \quad (1)$$

где λ — декремент электронного охлаждения. Простейший вид силы трения, отражающий все основные особенности замагниченного охлаждения, описан в [3]. В этой модели декремент можно записать в виде

$$\lambda(a) = \Lambda \frac{1}{\sqrt{a^2 + a_{eff}^2}^3}, \quad (2)$$

где Λ — параметр, характеризующий мощность охлаждения ($\text{см}^2/\text{с}$); a_{eff} — эффективная амплитуда ионных колебаний, начиная с которой скорость охлаждения начинает падать как $1/a^3$.

$$\Lambda = \frac{4r_e r_p Z^2 n_e \eta c \beta_x^3}{A \gamma^5 \beta^3} \ln\left(\frac{\rho_{max} + \rho_L + \rho_{min}}{\rho_L + \rho_{min}}\right), \quad (3)$$

$r_e = e^2/mc^2$, $r_p = e^2/Mc^2$ — классические радиусы электрона и протона; Z, A — заряд и масса иона в атомных единицах; n_e — плотность пучка; η — доля участка охлаждения в орбите ионов; γ, β — релятивистские параметры; β_x — значение горизонтальной бетафункции на участке охлаждения; $\rho_{max}, \rho_{min}, \rho_L$ — максимальный, минимальный прицельные параметры и радиус ларморовского вращения.

Для больших амплитуд $\Lambda = \lambda(a)a^3$, где $\lambda(a)$ — декремент охлаждения ионов с большой амплитудой $a \gg a_{in}$. Максимальную амплитуду ионов, которые успеют за время T охладиться до амплитуды меньше a_{in} (для упрощения $a \gg a_{eff}$), можно записать в виде

$$a = (a_{in}^3 + 3\Lambda T)^{1/3}. \quad (4)$$

При изменении амплитуды бамп-магнита меняется a_{in} или радиус на фазовой плоскости, начиная с которой вновь инжектированные частицы заполняют фазовую плоскость вплоть до максимально большого радиуса a_{out} . Считая, что фазовая плотность частиц из инжектора не меняется за время заполнения, получаем, что в зависимости от амплитуды бампа число инжектированных частиц меняется в соответствии с формулой

$$N_{inj} = N_0 \frac{a_{out}^2 - a_{in}^2}{a_{out}^2}, \quad (5)$$

где N_0 — максимально возможное число частиц при инжекции во всю апертуру. Доля же частиц, успевших охладиться до следующей инжекции, равна

$$N_{cool} = N_0 \frac{a^2 - a_{in}^2}{a_{out}^2}, \quad (6)$$

при условии, что амплитуда, определяемая (4), $a < a_{out}$. При маленьком значении a_{in} , когда центральная орбита подходит близко к септуму, его нож может поглощать ионы, находящиеся в хвостах распределения уже накопленного пучка.

Для гауссового распределения плотности ионного пучка с разбросом σ доля частиц внутри a_{in} определяется уравнением

$$N_{accum} = N_{cool}(1 - e^{-a_{in}^2/(2\sigma^2)}). \quad (7)$$

На рис. 2 показано сравнение этой модели с экспериментальными измерениями охлаждения ионов Kr_{84}^{+34} . На левом рисунке сплошная линия показывает вычисления в соответствии с (5), а пунктир — (7) и на правом рисунке линия проведена в соответствии с (3). Видно, что при малых электронных токах ($\ll 200$ мА) мощность охлаждения вполне описывается (3) но при больших эффекты пространственного заряда ограничивают мощность охлаждения.

На рис. 3 показана зависимость эффективности охлаждения от времени охлаждения T . Из рис. 3 можно видеть, что при увеличении T все большая часть ионов успевает охладиться, а при $T \sim 0.6$ с амплитуда, с которой могут охладиться ионы, становится больше максимальной $a > a_{out}$. Начиная с этого момента, все инжектированные частицы охлаждаются в область накопления, и эффективность охлаждения становится $N_{cool}/N_{inj} = 1$. Наилучшее согласие этих данных с (6) получено при $\Lambda = 51 \text{ см}^3/\text{сек}$, и эта простая модель вполне описывает данные по скорости накопления при разных T и b .

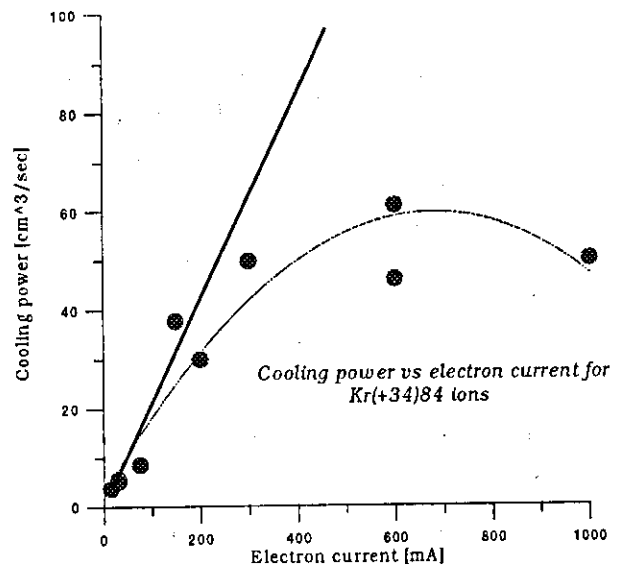
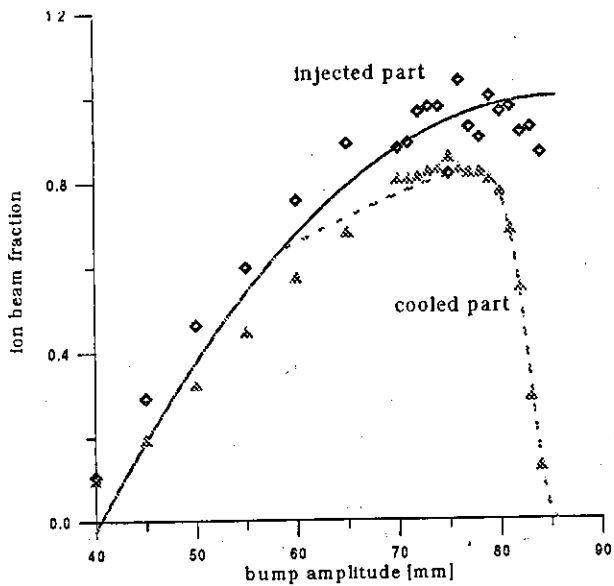
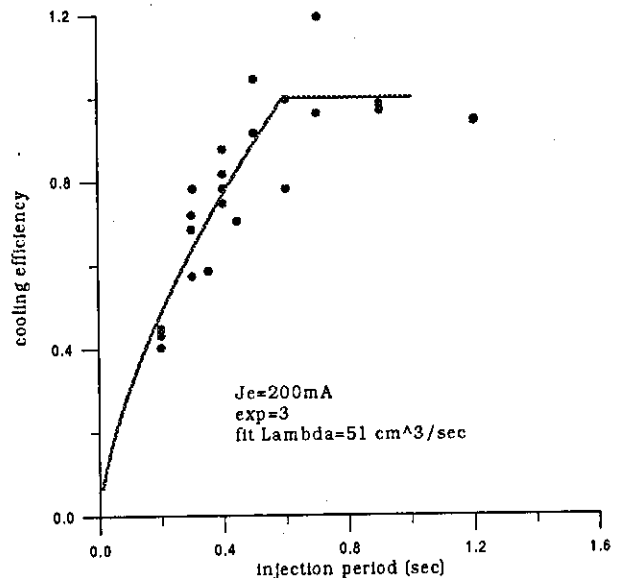


Рис. 2: Левый рисунок — влияние амплитуды бамп-магнита на долю инжектированного и на долю охлажденного пучков; правый — мощность охлаждения Λ от величины электронного тока. Ионы Kr^{+34} , энергия электронов — 6710 эВ, фактор расширения пучка — 3.

Рис. 3: Эффективность охлаждения (доля охлажденного пучка) в зависимости от длительности между инъекциями, Vi_{209}^{+67} , сплошная линия — подгонка в соответствии с (6).



Заклучение

Успешный запуск охладителя на синхротроне SIS ярко демонстрирует возможности замagnиченного охлаждения, позволяющего получать малые времена охлаждения при сравнительно высоких скоростях поперечного движения электронов. Эффективная амплитуда ионов, выше которой начинается рост времени охлаждения как a^3 , составила только 7 мм. Это соответствует скорости электронов $V_{eff} = 2.4 \cdot 10^6$ см/с и эффективной температуре электронного пучка 30 гр.К. При этом скорость потерь ионов из-за рекомбинации определялась температурой поперечного движения электронов и температурой катода 1000–1200 гр.К. Если бы декремент охлаждения определялся столь высокой температурой, то время охлаждения увеличилось бы в $(1000/30)^{3/2} \approx 150$ раз и, соответственно, заметного накопления ионного пучка добиться не

удалось бы. Некоторые сомневающиеся ускорительщики называют это охлаждение "русским", потому что добиться хорошего качества магнитного поля не очень легко, и во многих охладителях движение электронного пучка из-за изломов магнитного поля слишком сильное.

В ИЯФ были созданы и реализованы такие технологии магнитных систем, что угловые отклонения направления магнитного поля не превышают 10^{-5} , что и позволяет использовать замагниченное охлаждение в полную силу.

Список литературы

- [1] M.Steck, K.Blasche, W. Bourgeois, B.Franzke, L.Groening, N.S. Dikansky, V.I.Kudelainen, V.V.Parkhomchuk, A.I. Sharapa, A.V. Shemyakin, B.M. Smirnov. Proceedings of the 5th European Particle Accelerator Conference, Sitges, 1996, (World Scientific, Singapore, 1996) 1185.
- [2] M.Steck, K.Blasche, H.Eickhoff, B.Franzack, B.Franzke, L.Groening, T.Winkler, V.A.Dolgahev, V.V.Parkhomchuk. Commissioning of the electron cooling device in the heavy ion synchrotron SIS, Proceedings of the 6th European Particle Accelerator Conference, Stockholm, Sweden, 22-26 June 1998.
- [3] Parkhomchuk V.V. New insights in the theory of electron cooling, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 441 (2000) 9-17.