

ОТКРЫТЫЕ ВОПРОСЫ В ЭЛЕКТРОННОМ ОХЛАЖДЕНИИ

В. В. Пархомчук

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

Электронное охлаждение сегодня имеет многочисленные области использования, но все еще остаются недостаточно исследованными некоторые вопросы поведения ионного пучка под действием электронного охлаждения. Данный доклад представляет часть таких вопросов для более широкого обсуждения в надежде, что понимание динамики охлаждения интенсивного пучка ионов откроет новые перспективы для применения электронного охлаждения.

The electron cooling has a lot of applications, but some questions of the ion beams behavior under the action of the electron cooling are still not clearly understood. In this report we will concentrate on these questions with hope that discussion of the dynamics of cooling will open up new prospects for electron cooling using.

PACS: 29.25.-t

ВВЕДЕНИЕ

После первых экспериментов с электронным охлаждением казалось, что двухчастичная теория теплообмена ион–электрон вполне описывает результаты [1]. Однако почти сразу выяснилось, что электронный пучок после ускорения имеет сверхмалую продольную температуру, а продольное магнитное поле, замагничивая поперечное движение электронов, превращает сравнительно «горячий» электронный газ (1000 К) в сверххолодную плазму с эффективной температурой доли кельвина [2] по отношению к ион–электронным столкновениям. Экспериментальное и теоретическое понимание этой возможности открыло новый класс экспериментов с низкотемпературными ионными пучками. При этом энергия взаимодействия с ионами сравнивается с температурным разбросом энергий, и появляются возможности корреляции между частицами и даже переход к кристаллическим пучкам [3–5].

Переход к использованию электронного охлаждения для подготовки интенсивных пучков в физических экспериментах обнаружил неприятные явления быстрых потерь пучка. Авторы одной из первых публикаций на эту тему [6] утверждали, что потери связаны с нелинейными электрическими полями электронного пучка, и надеялись, что после увеличения диаметра электронного пучка эффекты потерь заметно уменьшатся. Однако в дальнейшем это увеличение диаметра электронного пучка не привело к заметному улучшению ситуации. Альтернативная точка зрения, что это связано с развитием плазменных широкополосных колебаний, обсуждалась на этом же совещании [7]. Основная

идея заключалась в том, что сгусток ионов испытывает силу трения пропорционально квадрату числа частиц, а масса сгустка растет только пропорционально числу частиц. При большой интенсивности чрезмерное возрастание взаимодействия может приводить к неустойчивости.

Особенностью замагниченного охлаждения является практическое отсутствие предела охлаждения, налагаемого величиной электронной температуры, которая всегда слишком мала. Охлаждение идет до ситуации, когда пространственный заряд ионного пучка начинает мешать дальнейшему охлаждению. В поперечном охлаждении к этому приводит ограничение, связанное со сдвигом поперечных колебаний собственным пространственным зарядом пучка, наводящим частицы на резонанс. При малой интенсивности может проявляться даже взаимная корреляция частиц, вплоть до образования кристаллических состояний. В продольном направлении при охлаждении сгруппированного пучка происходит охлаждение до полной компенсации продольного ВЧ-поля, создаваемого резонатором, и, соответственно, обнуление частоты синхротронного движения частиц. Подробно эти явления исследовались в [8]. Автор придерживается модели взаимодействия, основанной на периодическом входе и выходе плазмы ионного пучка в плазму электронную на участке охлаждения.

ПЕРВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА НАП-М «НЕУДАРЕНИЯ» ПРОТОННОГО ПУЧКА

Для исследования скорости электронного охлаждения на пластины впускного инфлектора подавался импульс напряжения, вызывающий когерентные колебания всего протонного пучка. Тонкая магниевая струя измеряла плотность протонного пучка в центре, и по амплитуде остаточного сигнала после «удара» определялась начальная амплитуда колебаний.

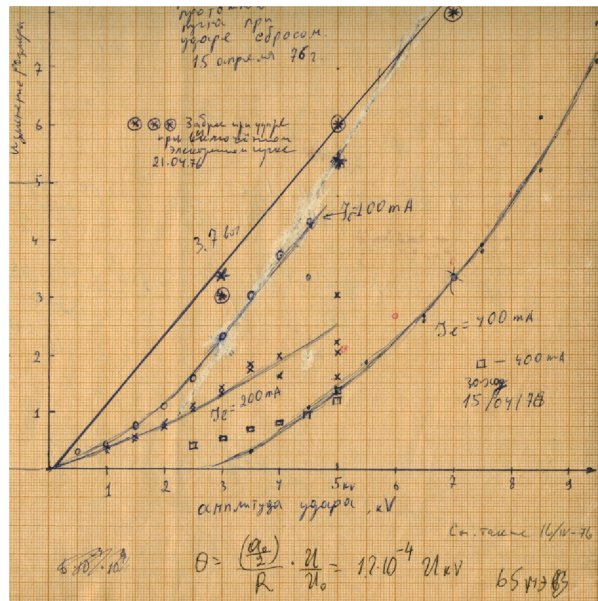


Рис. 1. Амплитуда колебаний ионного пучка после удара инфлектором при различных токах охлаждающего электронного пучка

баний пучка. На рис. 1 показана зависимость этой амплитуды от значения электронного тока $I_e = 0, 100, 200, 400$ мА. Хорошо видно, что при отсутствии электронного тока амплитуда колебаний линейно нарастает от амплитуды удара в соответствии с ожидаемыми оценками для параметров накопителя НАП-М. Но при введении охлаждения амплитуда колебаний после удара довольно значительно падает с током электронного пучка 6,5, 2,5, 1,25 мм.

Сразу возникла идея, что это результат когерентного затухания первоначальных колебаний протонного пучка до того как они (колебания) потеряют когерентность за счет перемешивания из-за разброса частот обращения. Эксперимент по искусственному уве-

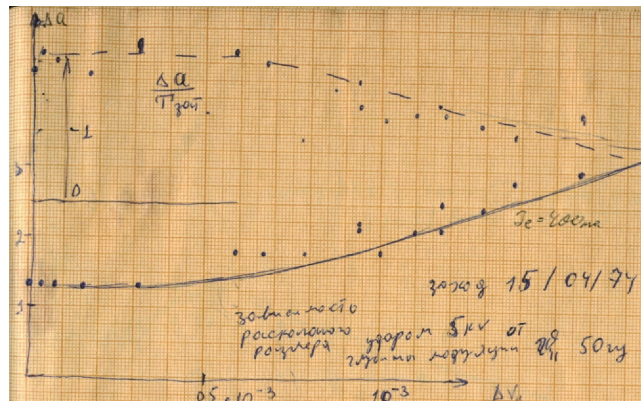


Рис. 2. Амплитуда колебаний в зависимости от амплитуды модуляции продольной скорости электронного пучка. $E_p = 65$ МэВ, $I_e = 400$ мА

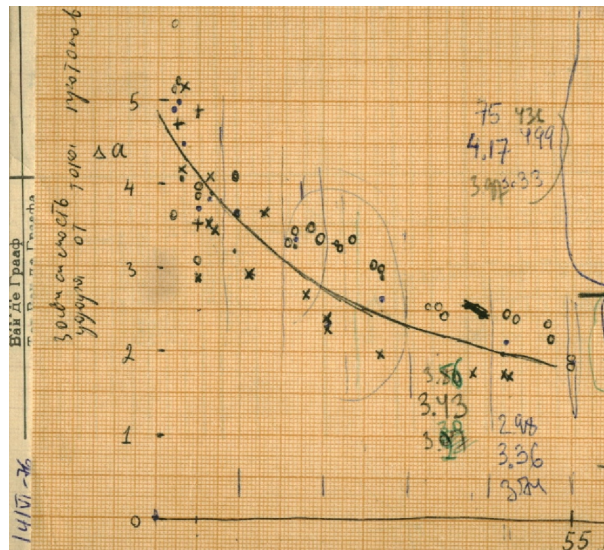


Рис. 3. Влияние протонного тока на амплитуду расщепления после удара инфлектором 5 кВ. Протонный ток изменялся от 55 мкА до, примерно, 1 мкА, а амплитуда от 2 до 5 мм

личению разброса импульсов путем модуляции энергии электронного пучка подтверждает это предположение. На рис. 2 показано, как возрастает амплитуда колебаний при модуляции энергии электронного пучка. Так, при сильной модуляции амплитуда приближается к максимальному значению 6 мм, которое соответствует раскачке без электронного пучка. При уменьшении протонного тока амплитуда тоже сильно возросла, как показано на рис. 3.

Это явление, конечно, отражает важную роль когерентного взаимодействия протонного и электронного пучков даже при 55 мкА. Первоначальные колебания с амплитудой 5–6 мм успевают сильно затухнуть за время «перемешивания частиц» в протонном пучке.

CELSIUS ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В экспериментах на накопителе CELSIUS, где использовалась высокая энергия инжекции и перезарядная инжекция для накопления протонного пучка с высокой интенсивностью (вплоть до 10 мА), наличие электронного пучка приводило к существенным потерям (рис. 4).

При инжекции в накопитель CELSIUS наблюдались быстрые потери протонного тока, и от начальной интенсивности 4 мА охлаждалось только около 100 мкА. Время жизни охлажденного пучка становилось значительно больше. Наличие или отсутствие самого охлаждения (охлаждение «выключалось» сильной отстройкой энергии электронного пучка) не меняло потери на начальном этапе.

При изменении начальной интенсивности наблюдалось уменьшение начальных потерь при инжекции в отстроенный по энергии электронный пучок (рис. 5).

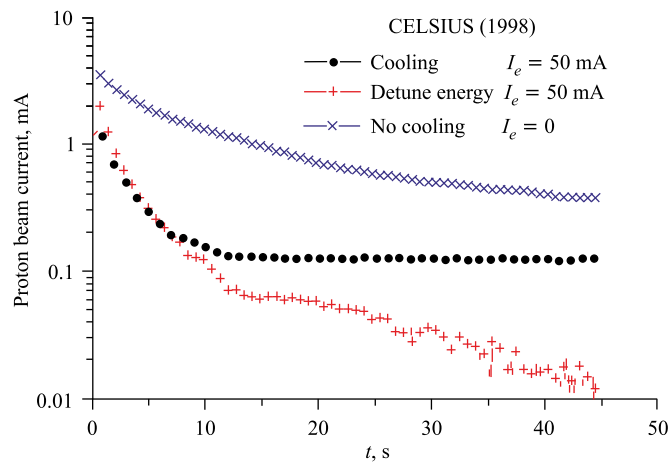


Рис. 4. Поведение интенсивности протонного пучка в зависимости от времени при различных параметрах электронного пучка

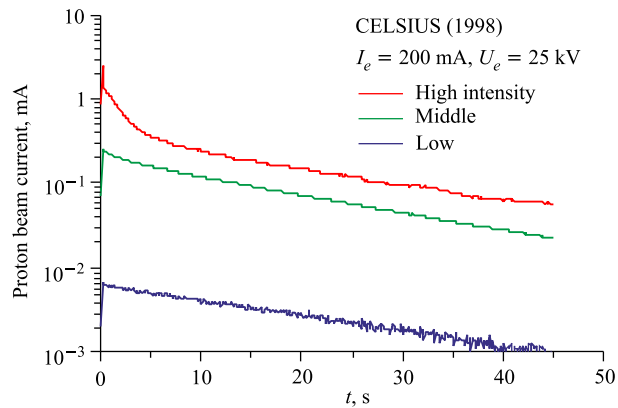


Рис. 5. Зависимость от времени тока протонного пучка при отстроенной от оптимальной энергии охлаждающих электронов и при разных начальных интенсивностях протонного пучка

LEIR ОХЛАЖДЕНИЕ ИОНОВ СВИНЦА

Во время испытания системы электронного охлаждения для LEIR наблюдались интересные явления изменения динамики охлаждения для второго инжектированного сгустка, как показано на рис. 6.

Видно, что вторая инжекция охлаждается заметно быстрее первой. Видимо, существенную роль играет внутривидовая релаксация, когда горячий вновь инжектированный пучок смешивается с уже охлажденной первой порцией, и затем идет электронное охлаждение уже перемешанного ионного пучка с меньшей начальной температурой.

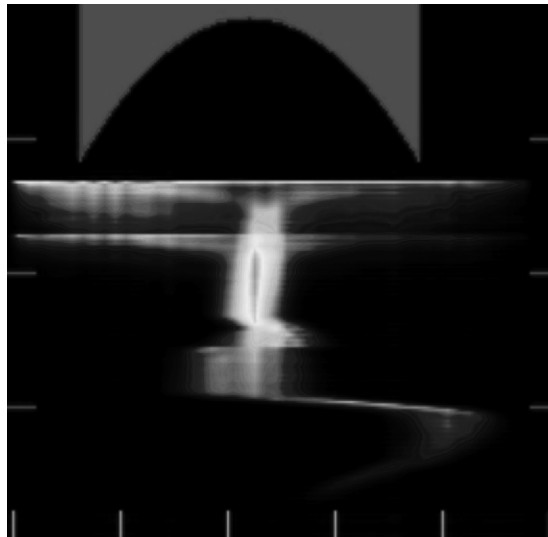


Рис. 6. Процесс охлаждения ионов свинца при двух последовательных инжекциях в накопителе LEIR. Показан профиль электронного пучка. По горизонтали между метками 10 мм, по вертикали вниз отметки времени через 1 с

CSRm и CSRe ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В накопителе CSRe в 2009 г. проводились эксперименты по охлаждению углеродного пучка с энергией 200 и 400 МэВ/нукл. Это были только самые первые попытки охладить пучки в CSRe, и время, отведенное на эти эксперименты, было сильно ограничено. На рис. 7–13 показано, как происходит процесс группировки первоначально равномерно распределенного пучка в короткий сгусток.

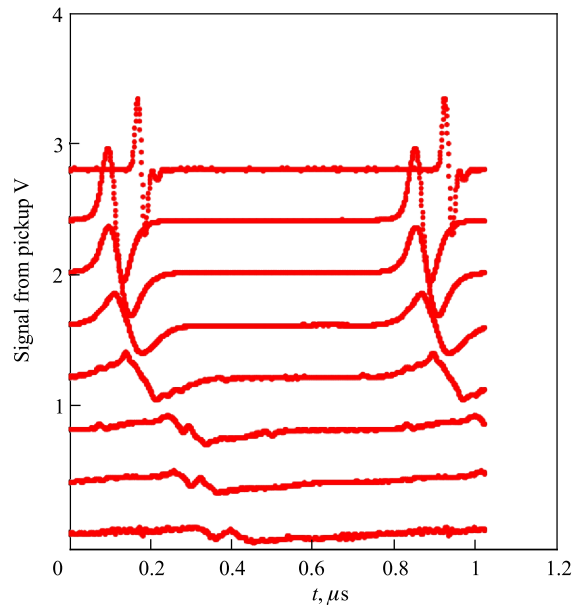


Рис. 7. Прямое наблюдение сигналов на пикапе при группировке 200 МэВ/нукл. при электронном охлаждении. Показаны первые 700 с охлаждения, в которые наблюдаются образование нескольких паразитных сгустков и довольно быстрые потери пучка

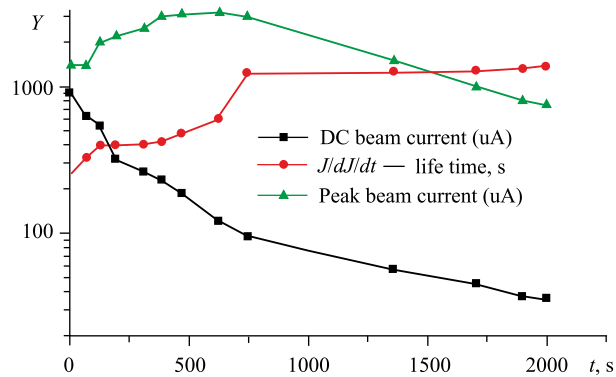


Рис. 8. Основные параметры углеродного пучка на первых этапах охлаждения. Из рис. 5, 6 видно, что первоначально пиковый ток нарастает до 3 мА и в это время наблюдаются потери пучка с образованием нескольких боковых сгустков

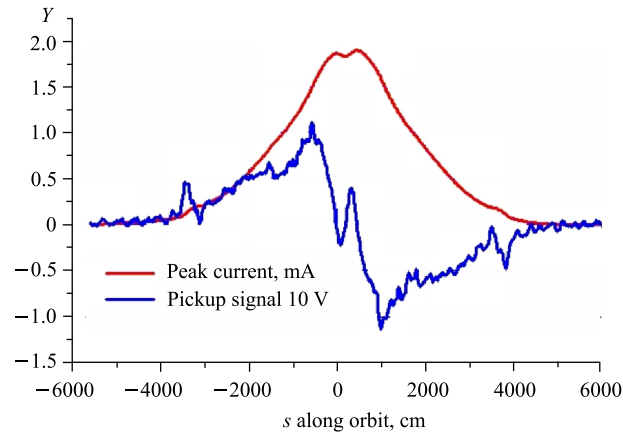


Рис. 9. Начальные стадии охлаждения при DC при ионном токе 0,7 мА, видны дополнительные сгустки

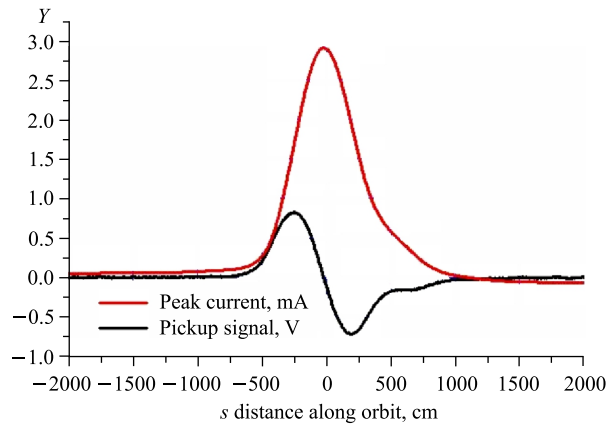


Рис. 10. Максимальный пиковый ток — 3 мА, и в сигнале с пикап-электрода наблюдается небольшой «хвост» колебаний после прохождения сгустка. Остался DC (постоянный) ток 0,14 мА, зато все микросгустки исчезли

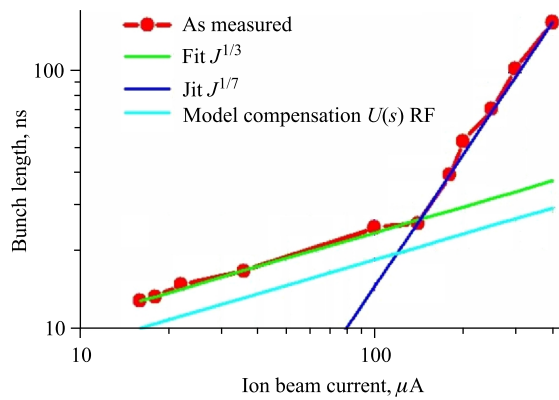


Рис. 11. Зависимость длины (сигмы по времени) ионного сгустка от значения среднего тока, выше 150 мкА наблюдается заметное превышение длины

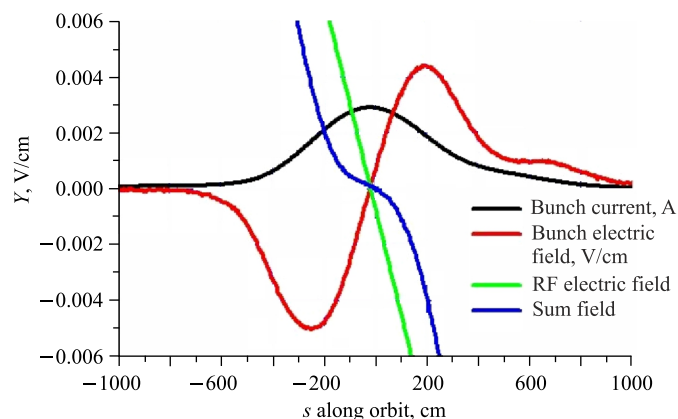


Рис. 12. Сравнение электрических полей ВЧ и полей расталкивания в пучке при среднем токе около 150 мкА

Наблюдается заметная компенсация поля от ВЧ-станции полем ионного пучка.

Свежие новости с CSRm были получены в начале 2011 г. Я позволю себе привести фрагмент из частного сообщения из IMP (Lanzou):

«Not long ago, a DR experiment was carried out at CSRm. The ion beam was 6.4 MeV/u Ni¹⁹⁺ for current about 15 μA. The electron current was 105 mA. We found the oscillations are stronger than previously test, even under the situation of small pulse width. The signals are shown in figure. During the test, 400 V positive pulses were applied to the cathode».

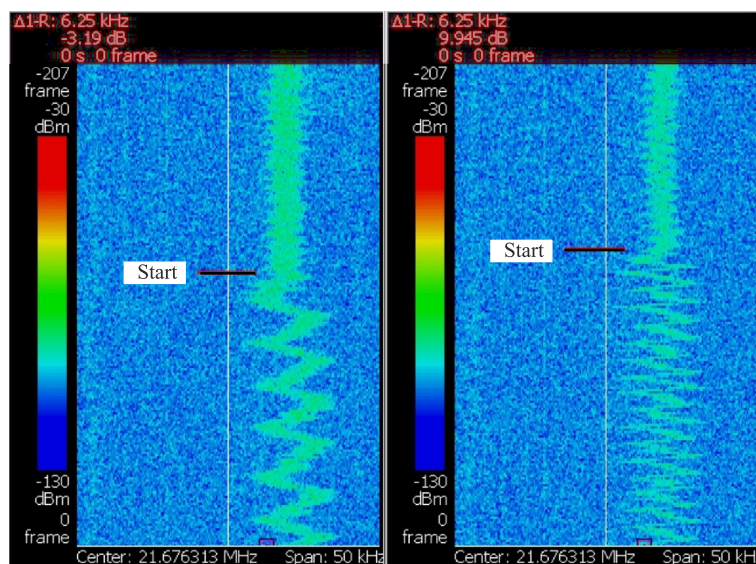


Рис. 13. Длительность импульса модуляции — 10 мс. Интервал между импульсами — 80 и 100 мс на левом и правом рисунке соответственно

Речь идет об опытах с рекомбинацией между ионами Ni^{19+} и электронным пучком. ИЯФ поставил на охладитель CSRm электронный блок, позволяющий на некоторое напряжение импульсно отстраивать энергию электронного пучка и измерять в это время рекомбинацию. Как видно из текста, при периодических «скачках» энергии электронов в системе ионный пучок — электронный пучок развиваются двухпучковые нежелательные колебания, затрудняющие измерения.

ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Многие из перечисленных явлений можно объяснить развитием неустойчивости в системе «плазма электронного пучка–плазма ионного пучка». Ионный пучок с периодом обращения в накопителе попадает в свежий электронный пучок, и в этой системе развиваются колебания, описываемые уравнением [9]:

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = \frac{Ze}{M_i} E_p, \dots, \frac{d^2 x_e}{dt^2} = -\frac{e}{m_i} E_p, \dots, E_p = 4\pi e(n_n x_e - n_i x_i),$$

где E_p — электрическое поле плазменных колебаний двухкомпонентной плазмы. В отличие от обычной плазмы это состояние существует только в течение короткого времени пролета участка охлаждения. На следующем обороте ионная флуктуация встречается со свежей порцией электронов. Детерминант матрицы, описывающей решение этого уравнения, не равен 1 и составляет

$$|A| = 1 - 2\frac{\omega_e^2 \omega_i^2}{\omega_p^4} \left(1 - \cos(\omega_p \tau) + \frac{\omega_e^2 \omega_i^2 \tau}{\omega_p^3} \sin(\omega_p \tau) \right).$$

Из рис. 14 видно, что 100 мА электронный ток сильно превышает порог возможного возникновения колебаний. Это даже удивительно, что можно получать столь большой ток. Скорее всего, это означает, что модель слишком простая и существуют другие факторы.

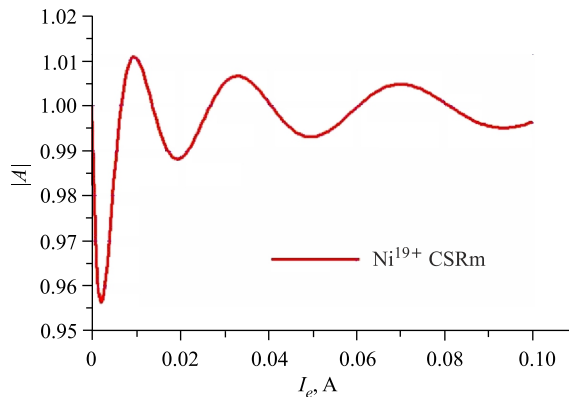


Рис. 14. Вычисление детерминанта матрицы плазменных колебаний вдоль участка охлаждения CSRm

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показывают многочисленные измерения пучков с электронным охлаждением, эффекты интенсивности могут существенно улучшить или ухудшить свойства ионного пучка. При использовании электронного охлаждения очень важно иметь это в виду и стараться создавать условия, когда эти особенности помогают решить поставленную задачу.

Благодарности. Автор этого обзора выражает большую благодарность коллективу, создавшему установку НАП-М, Г. И. Будкеру, А. Н. Скринскому, Н. С. Диканскому, И. Н. Мешкову, Д. В. Пестрикову, Б. Н. Сухине за многочисленные обсуждения, группе работающих на CELSIUS (особенно Дагу Рейстаду), коллективу накопителя LEIR, G. Tranquil и А. Бублею, и коллективу накопителей CSRm и CSRe X. D. Yang, В. Б. Рева и многим не упомянутым членам этих коллективов за возможность общения и совместной работы над электронным охлаждением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будкер Г. И. и др. Первые эксперименты по электронному охлаждению // 4 Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. 1974. Т. 2. С. 309; IEEE Trans. Nucl. Sci. 1975. V. VS-22. P. 2093-7.
2. Derbenev Y. S., Skrinsky A. N. Magnetization Effects in Electron Cooling // Proc. of the 10 Intern. Conf. on High-Energy Accelerators of Charged Particles, Protvino, Serpukhov, 1979. V. 2. P. 516–521; Fizika Plasmy. 1978. V. 4. P. 492–500.
3. Dementiev E. I. et al. Measurement of Thermal Noises of a Proton Beam at the NAP-M Storage Ring // JETP. 1980. V. 50. P. 1717–1719.
4. Steck M. et al. Electron Cooling Experiments at the ESR NIM // Phys. Rev. A. 2004. V. 532. P. 357–365.
5. Wei J. Crystalline Beams // Handbook of Accelerator Physics and Engineering / Eds. A. Wu Chao, M. Tigner. World Scientific, Singapore, 1998. P. 200–203.
6. Reistad D., Hermansson L. Measurements of Electron Cooling and «Electron Heating» at CELSIUS // Proc. of Workshop on Beam Cooling and Related Topics, Montreux, 1993. CERN 94-03 Yellow Reports. 1994. P. 183–187.
7. Parkhomchuk V. V., Pestrikov D. V. Coherent Instabilities at Electron Cooling // Ibid. P. 327–329.
8. Nagaitsev S. et al. Electron Cooling of Bunched Beams in the IUCF Cooler; Intensity Related Effects // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 391. P. 32–36.
9. Пархомчук В. В. Проблемы охлаждения интенсивных ионных пучков // IV науч. семинар памяти В. П. Саранцева. Дубна, 2002.