

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТОВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА НА ЭЛЕКТРОННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ

Н.С.Диканский, В.И.Кононов, В.И.Куделайнен,
И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, Б.Н.Сухина
Институт ядерной физики СО АН СССР, г. Новосибирск

Одним из путей получения малого времени затухания является увеличение плотности охлаждающего электронного тока. Однако существует ряд эффектов, которые с увеличением плотности электронного тока могут препятствовать получению малого времени затухания. Так как в проектах протон-антипротонных встречных пучков, основанных на методе электронного охлаждения (ИЯФ, ЦЕРН, Батавия), предполагается использование электронных пучков с плотностью $1+10 \text{ А/см}^2$, на накопителе НАП-М были проведены эксперименты по изучению влияния пространственного заряда электронного пучка на процесс охлаждения.

Основным эффектом, указывающим на влияние пространственного заряда, является нелинейная зависимость декремента затухания от электронного тока. На рис.1 приведены полученные в экспериментах зависимости декремента затухания (кривая "а"), скорости рекомбинации атомов водорода (dN/dt), продольной силы трения ($F_{||}$) от плотности электронного тока при диаметре катода 10 мм. Здесь же для сравнения приведена зависимость декремента от плотности электронного тока (кривая "б"), измеренная ранее для катода диаметром 20 мм. Катод, использованный в работе [1], обладал неоднородной эмиссией по поверхности: основная доля тока была смещена относительно центра пучка на 5 мм и имела размер примерно 10 мм.

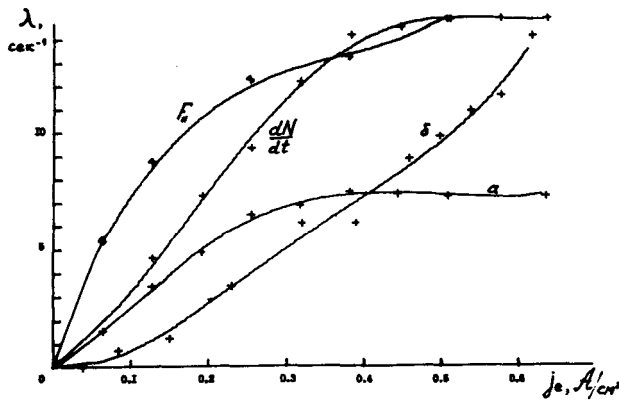


Рис. I. Зависимость от плотности электронного тока: а) - декремента затухания бетатронных колебаний катода диаметром 10 мм; б) - то же для катода диаметром 20 мм; F_{\parallel} - продольной силы; dN/dt - скорости рекомбинации атомов водорода.

Как видно из сравнения значений а) и б) рис. I, зависимости декрементов от тока существенно отличаются, что, по-видимому, связано с различием в распределении пространственного заряда.

Распределение плотности тока по сечению пучка для катода диаметром 10 мм изучалось в экспериментах по резонансной экстракции ионов из электронного пучка. Для этого на две параллельные пластины, встроенные в промежуток охлаждения, подавалось одновременно постоянное напряжение 50 В и переменное 10 В (длина пластин 64 см, расстояние между пластинами 6 см). Ток ионов имел максимум на резонансной частоте

$$f = \left(\frac{n e^2}{2 \bar{u} M} \right)^{1/2}.$$

Здесь M - масса однозарядного иона; n - плотность электронов в пучке; e - заряд электрона. На рис. 2 приведена зависимость квадрата резонансной частоты от электронного тока. Результаты этих экспериментов хорошо согласуются с предположением о равномерном распределении плотности электронного тока по сечению диаметром 10 мм, если принять, что основной компонентой остаточного газа является аргон.

Распределение скоростей электронов в дрейфовом промежутке определяется распределением потенциала, которое может изменяться внешними полями или полем пространственного заряда электронного пучка.

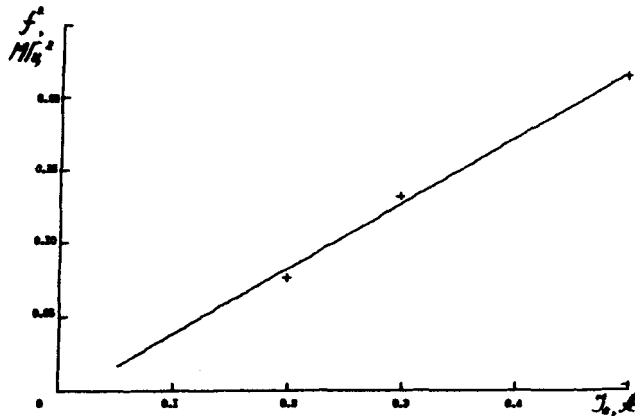


Рис.2. Зависимость квадрата резонансной частоты от электронного тока.

Так как скорости протонов в затухшем пучке равны скоростям электронов, то изменение скоростей электронов приводит к изменению энергии протонов и соответствующему изменению радиуса протонной орбиты. Это свойство малого в поперечном сечении (диаметр пучка 1 мм) затухшего протонного пучка использовалось в работе для измерения распределения скоростей электронов (потенциала) в электронном пучке.

Провисание потенциала в дрейфовом промежутке, обусловленное пространственным зарядом, можно скомпенсировать соответствующим изменением потенциала катода, контролируя эту компенсацию по отсутствию смещения протонного пучка. Этим методом можно определить зависимость потенциала внутри пучка от тока электронов (рис.3).

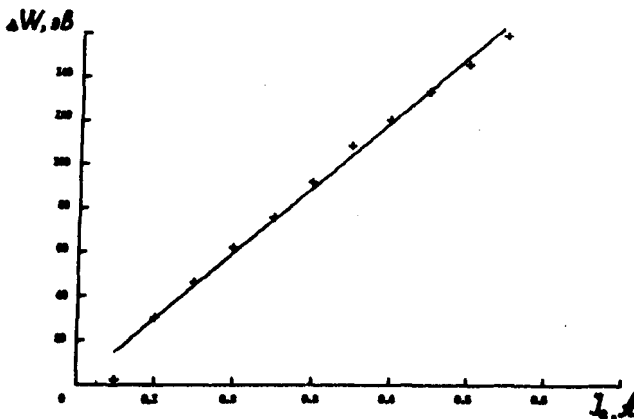


Рис.3. Зависимость приращения энергии электронов от электронного тока при фиксированном положении затухшего протонного пучка.

Ускоряющее напряжение линейно растёт с током, и наклон равен 290 В/А. Для нескомпенсированного электронного пучка расчёт даст значение наклона, равное 390 В/А. Это указывает на частичную компенсацию пространственного заряда электронного пучка.

Эти результаты качественно подтверждаются зависимостью ионного тока I_i , вытягиваемого из пучка, от разности потенциалов U между пластинами: ток ионов возникал лишь при $U_1 = 100$ В и достигал насыщения ($I_i \approx 60$ нА) при $U_2 = 260$ В для тока электронов $I_e = 300$ мА. При $I_e = 500$ мА значения U_1 и U_2 возрастали соответственно до 240 В и 400 В. Смещение электронного пучка по вертикали на ± 2 мм не приводило к радиальному смещению затухшего протонного пучка, при дальнейшем смещении возникало заметное радиальное смещение протонов.

В экспериментах с катодом диаметром 10 мм обнаружилась сильная зависимость декрементов затухания от радиального положения затухшего протонного пучка. Быстрое затухание наблюдалось в области шириной 3 мм. Влияние пространственного заряда на декремент затухания может быть связано с возрастанием эффективного разброса электронов по продольным скоростям на размере протонного пучка. Разница продольных скоростей электронов в центре и на краю нескомпенсированного электронного пучка составляет $0,5 \cdot 10^{-3} v_e$ для $I_e = 300$ мА и энергии электронов 32 кэВ. Такой разброс, как показали прямые измерения ¹²⁾, приводит к уменьшению декрементов вдвое.

Проведенные эксперименты указывают на существенное влияние пространственного заряда электронного пучка в процессе охлаждения даже при плотностях тока $300 + 600$ мА/см². Поэтому была предпринята попытка скомпенсировать пространственный заряд пучка с помощью пластин отсоса. На обе пластины подавался одинаковый отрицательный потенциал, препятствующий выходу ионов с участка охлаждения. Из измерений распределения потенциала электронного пучка следует, что действительно происходит накопление ионов, однако распределение ионов по сечению пучка сильно неоднородно.

Малый энергетический разброс в затухшем протонном пучке может приводить к появлению неустойчивостей в нём с малыми значениями пороговых токов протонов. В экспериментах наблюдалась продольная неустойчивость протонного пучка, которая выражалась в самопроизвольной группировке. Эта неустойчивость возникала

при максимальных декрементах затухания поперечных колебаний, при протонном токе 10 мкА и электронном токе 300 мА. Эта неустойчивость не приводила к потере пучка, так как радиальные колебания не превышали 0,5 мм. На рис.4 показан сигнал с интегрального пикап-электрода после синхронного детектирования с опорной частотой, сдвинутой относительно частоты обращения на 160 Гц. Кривая "а" соответствует протонному току 10 мкА, кривая "б" - 40 мкА при электронном токе 300 мА. Видно, что время нарастания неустойчивости составляет 30 мс при токе протонов 40 мкА.

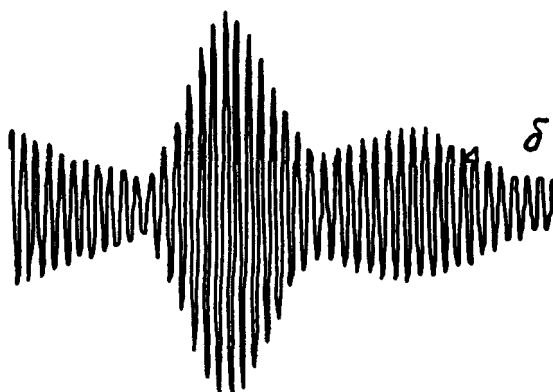


Рис.4. Сигнал с интегрального пикап-электрода:
а - протонный ток 10 мкА, б - протонный ток 40 мкА. Электронный ток 300 мА, время развертки 0,7 с.

Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Будкер, А.Ф.Будушев, Н.С.Диканский, В.И.Кононов, В.И.Куделайнен, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, А.Н.Скринский, Б.Н.Сухина. Доклад на У Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц, препринт ИЯФ 76-92, Новосибирск, 1976.
2. Г.И.Будкер, Н.С.Диканский, В.Н.Куделайнен, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, А.Н.Скринский, Б.Н.Сухина. Доклад на X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Серпухов, 1977.

ДИСКУССИЯ

Э.А.Мяэ: Чем Вы объясняете качественное отличие кривых, показывающих зависимость декрементов от плотности электронного тока, для катодов разных размеров?

Н.С.Диканский: Здесь не простое изменение геометрических размеров катода. Кроме изменения катода меняется подогрев и меняются условия вытягивания электронов. При изменении температуры может изменяться распределение плотности электронов в охлаждающем пучке.

E.D.Courant: Have you studied or are you planning to study accumulation of beams by cooling a newly injected proton beam in the presence of a previously cooled beam?

Н.С.Диканский: Поскольку размер охлажденного пучка мал, накопление возможно, и мы собираемся это исследовать. Конкретные же схемы накопления могут быть различны.

R.L.Martin: As one cools the beam the density increases and one approaches the space charge limit. Isn't it true that if one can reach the space charge limit in other ways that electron cooling would not help?

Н.С.Диканский: Действительно, из-за малого размера охлажденного пучка эффекты пространственного заряда протонов заметны уже и сейчас, и эта проблема будет особенно важна для ускорителей тяжелых ионов. Однако размер накопленного пучка будет меняться либо за счет приближения к резонансам, либо можно искусственно его увеличивать.