

Исследование колебаний пространственного заряда в установках электронного охлаждения

© С.Г. Константинов, В.В. Пархомчук, В.Б. Рева

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: reva@csd.inp.nsk.su

(Поступило в Редакцию 4 апреля 2002 г.)

Электронное охлаждение используется для улучшения параметров ионных пучков. Эффективность охлаждения существенно зависит от интенсивности флуктуаций пространственного заряда в пучке. Их наличие на участке охлаждения приводит к стохастическому нагреву ионов, что ведет к ухудшению охлаждения или даже гибели ионного пучка. Описаны результаты экспериментов по исследованию интенсивности флуктуаций пространственного заряда от различных параметров работы охладителя. Предложен механизм возникновения флуктуаций и сделаны оценки возможного влияния зарегистрированных флуктуаций на параметры ионного пучка.

Введение

Электронное охлаждение используется для улучшения параметров ионных пучков в накопителях [1]. Метод основан на использовании холодного электронного пучка, движущегося со средней скоростью ионов на общем с ионным пучком прямолинейном участке орбиты. Столкновения ионов с электронами приводят к потере энергии хаотического движения ионов. Для получения достаточно малого времени охлаждения требуется интенсивный электронный пучок с токами в несколько ампер и энергией от нескольких киловольт [2] до нескольких MeV [3]. Как правило, такие пучки получают в системах с рекуперацией энергии, когда пучок ускоряется до полной энергии, а затем энергия электронов возвращается в источник в замедляющей системе. Замедление производится до минимально возможного значения в 1–5 keV, определяемого пространственным зарядом пучка. Эффективность захвата электронного пучка в коллектор, как правило, высока, но все-таки малая доля электронного пучка может отражаться от коллектора и попадать на участок охлаждения. При этом могут возникать колебания полей пространственного заряда пучка, вызывающие нагрев ионного пучка. Если эти шумы достаточно велики, то электронный пучок может вместо охлаждения вызвать нагрев и потерю части ионов. В данной работе представлены результаты исследования колебаний пространственного заряда, возникающих в установке с прямолинейным магнитным полем. Измерения проводились на стенде по тестированию пушки и коллектора, предназначенных для создания установки электронного охлаждения для Института современной физики (Ланьчжоу, Китай).

Схема установки и методика измерений

Принципиальная схема установки приведена на рис. 1. Электронный пучок формировался электронной пушкой (1–4) [4], помещенной в магнитное поле величи-

ной 700–1000 Gs, и транспортировался вдоль магнитного поля до коллектора электронов (4–6). Цифрами на рисунке обозначены: 1 — катод, 2 — управляющий электрод, 3 — анод, 4 — вакуумная камера, 5 — приколлекторный электрод, 6 — супрессор, 7 — коллектор, 8 — пробник. Диаметр пучка в зависимости от режима составлял 2–3 см.

Для измерения шумовых характеристик использовалось несколько экспериментальных схем. Первая схема пассивная. Шумы пространственного заряда пучка через специальную рамку, находящуюся вблизи пучка и имеющую емкость относительно пучка порядка 1.5 pF, регистрировались спектроанализатором, либо высокочастотным осциллографом. Вторая схема активная. Колебания в пучке возбуждались с помощью подачи переменного напряжения на управляющий электрод (волна, распространяющаяся вдоль по потоку) или на приколлекторный электрод (волна, распространяющаяся против потока) с последующей регистрацией отклика с коллектора и с рамки, используемой в качестве регистрирующего пикап электрода.

На рис. 2 показан продольный профиль потенциала электрического поля с учетом объемного заряда, выполненный для типичных параметров эксперимента

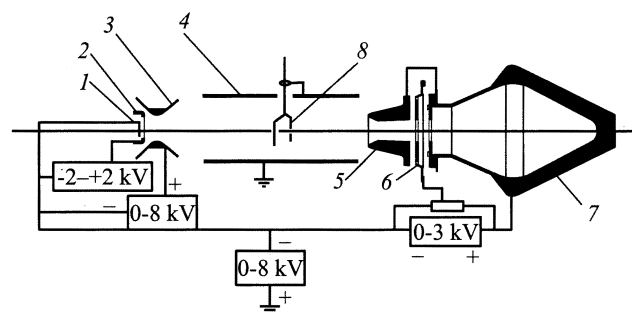


Рис. 1. Схема установки для исследования колебаний пространственного заряда.

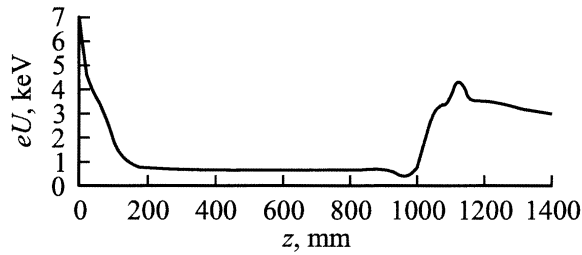


Рис. 2. Продольный профиль потенциала на оси установки с учетом влияния пространственного заряда.

$U_{\text{coll}} = 3 \text{ kV}$, $U_{\text{supr}} = 0.5 \text{ kV}$, $U_{\text{cath}} = 7 \text{ kV}$, $U_{\text{an}} = 3.5 \text{ kV}$, $U_{\text{contr}} = +0.6 \text{ V}$, ток $J_e = 900 \text{ mA}$). Напряжение катода отсчитывается от земли, напряжение коллектора и анода — от катода. Потенциал супрессора задается делителем напряжения, установленным между коллектором и катодом. Положение 0 соответствует напряжению супрессора, равному напряжению катода, 1 — напряжению коллектора. Расчеты выполнены комплексом программ SAM.

Из рисунка видно, что с таким профилем потенциала возможно накопление вторичных электронов в области между коллектором и анодом. Они могут туда попадать за счет ионизации остаточного газа или после отражения от коллектора. Упруго- и неупругоотраженные электроны попадают в центральную область, где и накапливаются. При накоплении пространственного заряда выше некоторого предела развивается неустойчивость, приводящая к сбросу вторичных электронов.

Неустойчивость

В ходе экспериментов по изучению свойств развивающейся неустойчивости были отмечены следующие экспериментальные факты.

1) „Вспышечный“ характер развития неустойчивости. На рис. 3 показана временная осциллограмма развития неустойчивости. Она была измерена в режиме открытого коллектора, когда $U_{\text{coll}} = U_{\text{supr}}$. Сигнал снимался на высокоомный вход осциллографа с параллельным подключением конденсатора емкостью 1000 pF . На этой картине можно видеть отдельную „вспышку“ неустойчивости длительностью порядка $20 \mu\text{s}$ ($70\text{--}95 \mu\text{s}$, кривая 2). Здесь же нарисован сигнал, возникающий при прохождении через рамку импульса тока величиной 1 A и длительностью $280 \mu\text{s}$ (кривая 1). Видно, что в конце „вспышки“ сигнал выходит на уровень ($t = 100 \mu\text{s}$, кривая 2), отличающийся от первоначального ($t = 50 \mu\text{s}$, кривая 2) на 30% к сигналу от основного пучка (кривая 1). Это свидетельствует о том, что за время „вспышки“ неустойчивости часть вторичных электронов с суммарным зарядом до 30% от заряда основного пучка была удалена из центральной области. Ниже показана динамика развития неустойчивости при регистрации сигнала на нагрузку 50Ω . В этом случае сигнал пропорционален dn/dt , поэтому накопления не видно, зато хорошо видны колебания при развитии неустойчивости. Время нарастания неустойчивости $\sim 5 \mu\text{s}$, время квазистационарного участка, за которое и происходит удаление избыточного пространственного заряда из центральной области, $\sim 10 \mu\text{s}$. Основная частота $70\text{--}100 \text{ mHz}$.

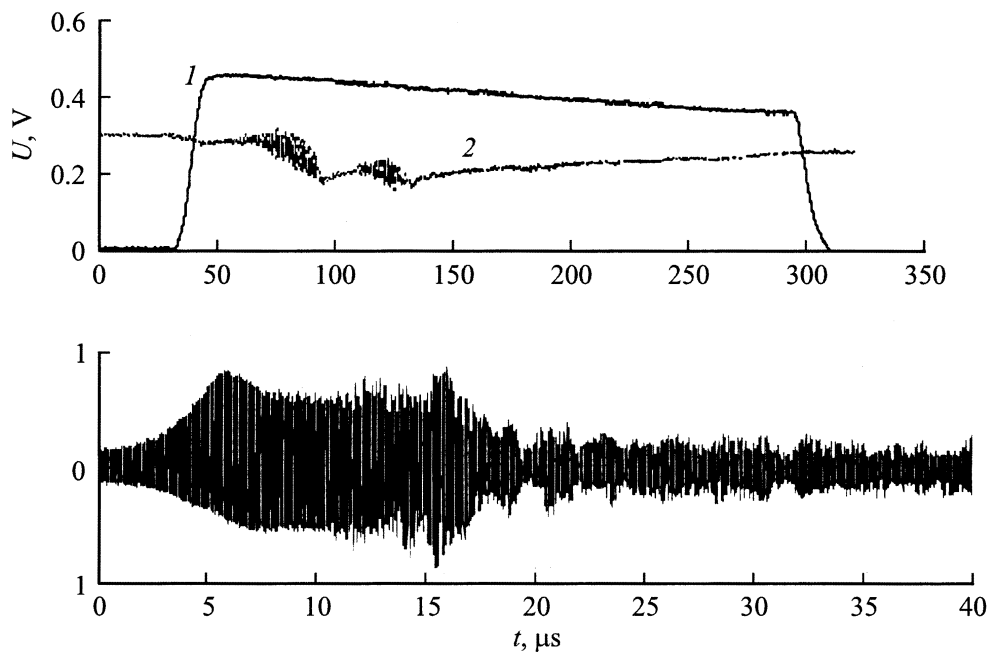


Рис. 3. Изменение величины пространственного заряда n и dn/dt в области рамки при развитии неустойчивости.

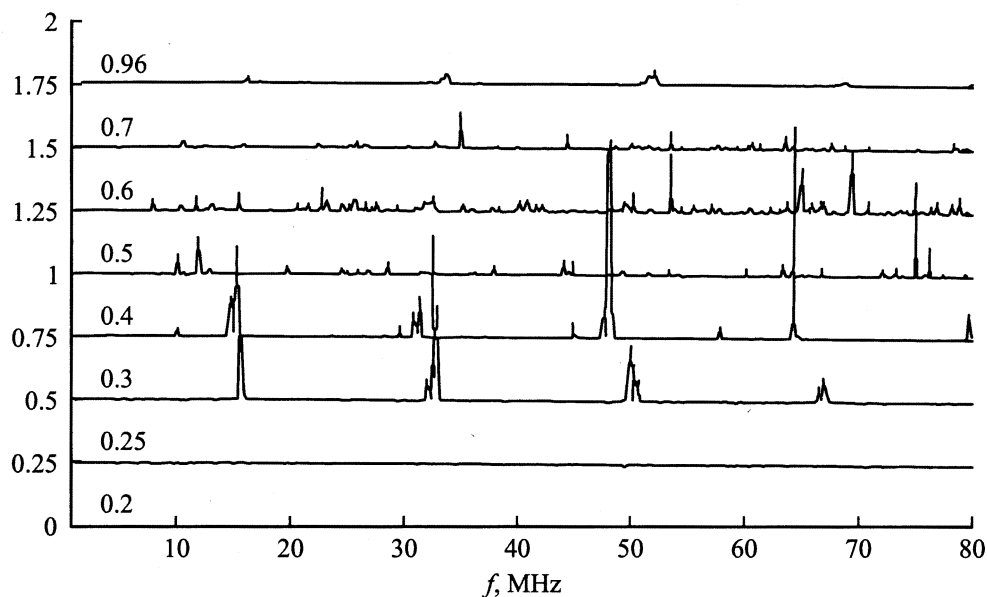


Рис. 4. Изменение интенсивности неустойчивости от тока пучка. По оси ординат амплитуда колебаний в а.е. Цифры у кривых — значения тока пучка в А.

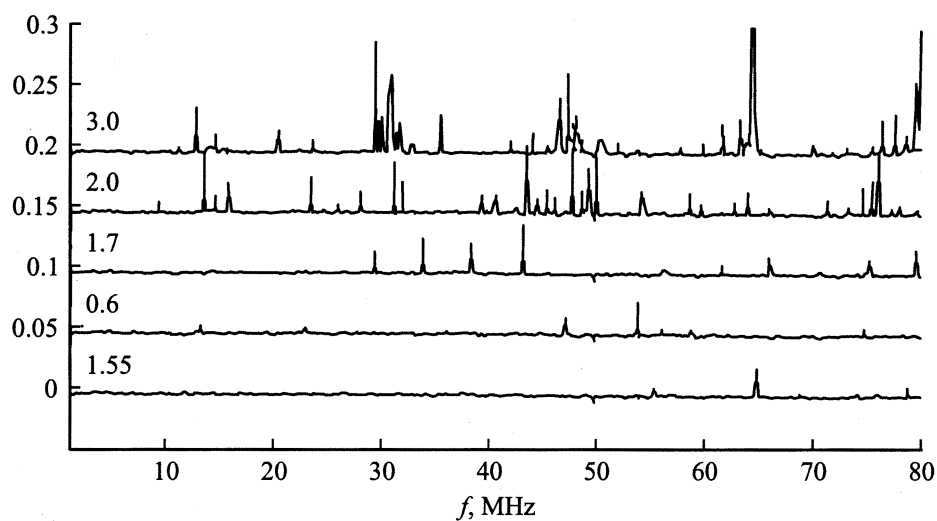


Рис. 5. Изменение интенсивности неустойчивости в зависимости от режима работы коллектора. По оси ординат — амплитуда колебаний в а.е. Цифры у кривых — значения напряжения в kV.

Средняя частота всплесков составляет 100–1000 Hz, что дает оценку среднего тока накопления заряда в данном режиме на уровне 30–300 nA.

2) Пороговое поведение неустойчивости по току пучка. На рис. 4 показан набор спектров колебаний пространственного заряда в зависимости от тока пучка. Спектры снимались в режиме, когда к супрессору прикладывалось напряжение -600 V относительно коллектора. Измерения спектра проводились с помощью спектр-анализатора СК4-59.

Видно, что до тока 300 mA собственных колебаний в пучке не наблюдается, но при его превышении в пучке быстро развивается неустойчивость. При слабом

превышении порога хорошо видны отдельные пики гармонических колебаний, но при дальнейшем увеличении тока пучка число этих пиков существенно возрастает и спектр становится более „шумным“. При дальнейшем увеличении тока пучка число и амплитуда пиков уменьшаются, и при достаточно большом токе неустойчивость практически пропадает. Изменение магнитного поля изменяет порог развития неустойчивости с 270 mA при магнитном поле 700 Gs до 420 mA при 1050 Gs, но не меняет его пороговый характер.

3) Влияние коллекторных параметров на неустойчивость. Наиболее резко неустойчивость зависит от величины супрессорного напряжения. При

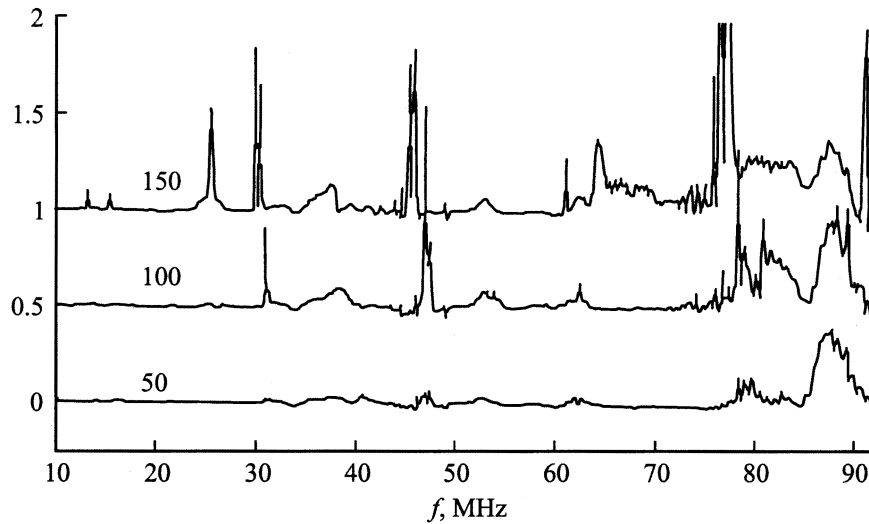


Рис. 6. Изменение спектров вынужденных колебаний в зависимости от тока пучка. По оси ординат — амплитуда колебаний в а.е. Цифры у кривых — значения тока пучка в мА.

величине супрессорного напряжения, равной напряжению коллектора (открытый коллектор), интенсивность неустойчивости максимальна и превышает значение в других режимах более чем в 10 раз. Однако небольшое запирающее напряжение для электронов (порядка 30 В), приложенное к супрессору, кардинально улучшает ситуацию. Дальнейшее увеличение запирающего напряжения (вплоть до величин $U_{\text{cath}} = U_{\text{supr}}$) практически не влияет на неустойчивость. В режиме открытого коллектора также не удастся подавить неустойчивость за счет уменьшения тока пучка. Даже при токе в 50 мА наблюдаются колебания пространственного заряда в пучке. Изменение магнитного поля, катодного напряжения и напряжения коллектора не изменяет этой картины. Режим с открытым коллектором оставался самым „шумным“ при прочих равных условиях.

На поток вторичных электронов можно было повлиять путем выбора режима работы коллектора (рис. 5). Если понизить напряжение коллектора до состояния, близкого к образованию в нем виртуального катода, то в этом случае за счет большого пространственного заряда можно запретить в нем большую часть отраженных энергичных электронов.

4) **Вынужденные колебания.** Интересные данные были получены при регистрации вынужденных колебаний в предпороговой области развития неустойчивости. Раскачка подавалась на приколлекторный электрод (рис. 1, 5). Вынужденный сигнал снимался с пробника. Регистрировалось распространение внешнего сигнала против потока основного пучка. В области 75–100 МГц видно (рис. 6) наличие отклика, связанного со вторичными электронами, вылетающими из коллектора. В низкочастотной области при приближении к порогу наблюдается вынужденная раскачка собственных колебаний столба вторичных электронов. По мере приближения к порогу возрастает амплитуда линий.

Механизм накопления зарядов

Таким образом, можно высказать предположение, что в режиме открытого коллектора основную роль в возникающих колебаниях пространственного заряда играют истинно-вторичные электроны, имеющие энергию внутри коллектора ~ 10 эВ. Родившись в коллекторе, они вдоль поверхности коллектора попадают и накапливаются в центральной области. При превышении некоторой пороговой плотности вторичных частиц возникает неустойчивость, выбрасывающая вторичные электроны из центральной области. При подаче небольшого отрицательного (относительно коллектора) напряжения на супрессорный электрод происходит задержание основной массы вторичных электронов. При этом в силу геометрического фактора наибольшее изменение потенциала происходит именно вблизи супрессорного электрода. Его влияние в центре пучка значительно меньше. Дальнейшее увеличение запирающего напряжения на супрессоре не влияет на поток истинно вторичных электронов, и основной вклад в поток частиц из коллектора дают упруго- и неупругоотраженные электроны большой энергии (> 50 эВ).

Роль электронов ионизации, по-видимому, невелика (поток электронов ионизации для условий нашего эксперимента может быть оценен величиной ~ 50 нА). Изменение давления в вакуумной камере в 2 раза практически не влияло на интенсивность и спектральный состав неустойчивости. Возможность уменьшить интенсивность неустойчивости за счет выбора напряжения коллектора также свидетельствует о том, что коллектор является основным поставщиком электронов в центральный участок. Увеличение пространственного заряда в коллекторе влияет на поток отраженных электронов, но не влияет на поток электронов ионизации.

В качестве модели неустойчивости может быть рассмотрена пучковая неустойчивость на запертых частицах. Когда частота волны пространственного заряда пучка $\omega = kv_0$ приближается к собственной частоте колебаний захваченных электронов $\omega = n\omega_0$, возможно появление нарастающих колебаний. Здесь $\omega_0 = 4\pi L/v_0$, L — размер электростатической ямы, v_0 — скорость осцилляций захваченных электронов, n — произвольное целое число (набор гармоник появляется из разложения уравнения равномерного движения электрона между электростатическими пробками по гармоническим функциям). Решая дисперсионное уравнение, соответствующее данной модели, можно получить неустойчивые решения для определенных значений волнового вектора. Инкремент получившейся неустойчивости линейно растет с ростом номера моды n и его характерное значение для условий нашего эксперимента $\text{Im}(\omega) = 4 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ($n = 1$).

Охлаждаемая апертура

Время охлаждения иона, имеющего амплитуду колебаний в накопителе определяется выражением [5]

$$\tau^{-1}(a) = \frac{2\pi(J_e/q)r_e r_i \text{Lnc} \eta}{\beta^4 \gamma^5 (\sqrt{a^2 + a_{\text{eff}}^2}/\beta_{\perp})^3} \begin{cases} 1/(\pi a_e^2) & a < a_e, \\ 1/(\pi a^2) & a > a_e, \end{cases} \quad (1)$$

где J_e — ток электронного пучка; q — заряд электрона; r_e, r_i — классические радиусы электрона и иона; Lnc — кулоновский логарифм; η — доля участка охлаждения в длине орбиты ионов; β, γ — параметры пучков; a_{eff} — эффективная амплитуда, ионы с меньшей a_{eff} амплитудой охлаждаются с минимальным временем; a_e — радиус электронного пучка; β_{\perp} — значение бета функции на участке охлаждения; f_0 — частота обращений в накопителе.

В простейшей модели, когда шумы электронного пучка определяются флуктуациями тока (а флуктуации на каждом обороте иона случайны), можно записать скорость увеличения амплитуды ионов в виде

$$\frac{da^2}{dt} = f_0 \left[\frac{2\langle J_e \rangle r_i l_{\text{cool}} \beta_{\perp}}{q\beta^3 \gamma^3 c} \right]^2 \begin{cases} a^2/a_e^4 & a < a_e, \\ 1/a^2 & a > a_e, \end{cases} \quad (2)$$

где $\langle J_e \rangle$ — величина среднеквадратичных флуктуаций тока электронного пучка или соответствующее ему изменение пространственного заряда пучка.

Из выражения (1) видно, что время охлаждения быстро нарастает с увеличением амплитуды колебаний (вне электронного пучка как a^5), а значит, и мощность охлаждения ($a^2/\tau(a)$) падает быстрее мощности нагрева шумами пучка. Начиная с некоторой критической амплитуды, охлаждение не компенсирует нагрев и ионы будут неограниченно увеличивать амплитуду колебаний, пока не погибнут на стенках вакуумной камеры. На

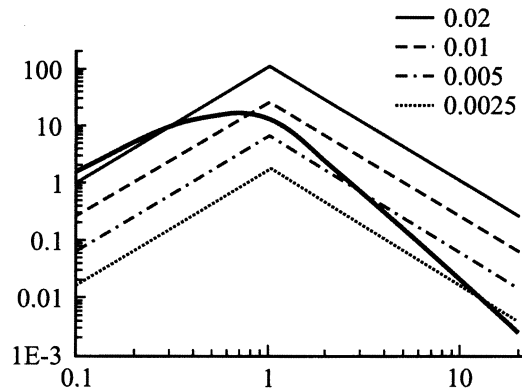


Рис. 7. Мощность охлаждения и нагрева (ось ординат, cm^2/s) при различных амплитудах пульсаций электронного тока $\Delta J_e/J_e = \xi = 2, 1, 0.5, 0.25\%$. Ось абсцисс — амплитуда колебаний иона (см). Сплошная жирная кривая — охлаждение.

рис. 7 показаны в логарифмическом масштабе для примера мощности нагрева и охлаждения для параметров охладителя, близкого к [4].

Из рис. 7 видно, что при 2% флуктуациях электронного тока охлаждаться будут ионы только с амплитудами менее 3 мм, а все остальные нагреются и погибнут. Для нормальной эксплуатации охладителя пучно добиться шумов электронного пучка, не превышающих 0.1%, при этом критическая амплитуда становится больше 10 см.

Влияние наблюдаемых флуктуаций пространственного заряда на эффективность охлаждения оценивалась по измеренному среднеквадратичному значению флуктуаций плотности пространственного заряда. Чтобы использовать оценочную формулу (2), данное значение пересчитывалось в эквивалентное ему значение флуктуации полного тока пучка ($\delta J_e = eV_0 \delta n S$). При значении супрессора 0.8 относительная величина флуктуации тока составляла $\langle \delta J_e \rangle / J_e \approx 3 \cdot 10^{-4}$, а при значении супрессора 1.0 (открытый коллектор) $\langle \delta J_e \rangle / J_e \approx 2 \cdot 10^{-2}$. Это соответствует времени жизни ионного пучка 10^4 s при наличии запирающего напряжения на супрессоре и 10 s при открытом коллекторе. Последнее значение явно неприемлемо для работы установки электронного охлаждения. Таким образом при неблагоприятных условиях наличие колебаний пространственного заряда может приводить к сильным потерям ионного пучка.

Список литературы

- [1] Будкер Г.И. // Атомная энергия. 1967. Т. 22. № 5. С. 246–258.
- [2] Steck M. et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 2000. Vol. A441. P. 175–182.
- [3] Nagaitsev S. et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 2000. Vol. A441. P. 241–245.
- [4] Antokhin E.I. et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 2000. Vol. A441. P. 87–91.
- [5] Пахромчук В.В., Скринский А.Н. // УФН. 2000. Т. 170. № 5. С. 473–493.