

Методы подавления пучково-дрейфовой неустойчивости в нейтрализованном электронном пучке

Ю.В. Коротаев, И.Н. Мешков, А.Л. Петров, А.В. Смирнов, Е.М. Сыресин
ОИЯИ, Дубна, Россия
Ж. Боссер, Р. Лей, Р. Маккаферри, Ж. Молилари, Ж. Транквиль, Ф. Варенне
ЦЕРН, Женева, Швейцария

Основным ограничением величины тока интенсивного нейтрализованного электронного пучка является возбуждение пучково-дрейфовой неустойчивости. Для ее подавления предложено использовать методы очистки вторичных электронов с помощью специальных электродов и нагрев ионов гармоническим электрическим полем в поперечном и продольном направлении. Описываются эксперименты по подавлению неустойчивости данными методами.

Введение

В экспериментах на стенде ОИЯИ и системе электронного охлаждения LEAR (ЦЕРН) было показано, что можно выделить две главные причины развития пучково-дрейфовой неустойчивости: существование обратной связи и низкий уровень температуры ионов остаточного газа.

Условие стабильности электронного пучка, нейтрализованного медленными ионами $K\chi < 1$, которое дает пороговую плотность тока [1]

$$J_{th} = \frac{2\varepsilon_0}{k} \cdot \frac{v_e^2 B}{L}, \quad k = \frac{\eta}{\varepsilon''} \ln K, \quad (1)$$

где χ — коэффициент обратной связи; K — коэффициент усиления колебаний электронов и ионов; v_e — скорость электронов; B — магнитное поле; L — длина нейтрализованного пучка; η — коэффициент нейтрализации, равный Zn_i/n_e , где n_i , n_e — плотности ионов и электронов; Ze — заряд иона; ε'' — мнимая часть диэлектрической проницаемости. Главным источником обратной связи является поток вторичных электронов, покидающих коллектор и движущихся вдоль пучка в противоположном направлении. Коэффициент усиления K зависит от температуры ионов: чем она ниже, тем больше K . Поэтому для стабилизации пучка требуется дополнительный нагрев ионов.

Очистка вторичных электронов

Для уменьшения обратной связи, вносимой вторичными электронами, на стенде ОИЯИ были установлены чистящие электроды между коллектором и коллекторной пробкой [2] и специальный разрезной управляющий электрод трехэлектродной электронной пушки (конструкция пушки аналогична разработанной ранее для накопителя LEAR [3]).

Чистящие электроды представляют собой два металлических полуцилиндра, между которыми установлено проводящее стекло. Длина и диаметр этих электродов соответственно равны $l = 40$ см и $b = 10$ см. Положительный потенциал 4-6 кВ прикладывается к одному электроду, отрицательный 0-2 кВ — к другому. Две катушки корректирующего поперечного магнитного поля B_{\perp} (до 40 Гс) размещены снаружи вакуумной камеры. Если $B_{\perp} = E_{\perp} / v_e$, где E_{\perp} — поперечное электрическое поле чистящих электродов, первичный пучок не испытывает возмущение, а

вторичные электроны смещаются на величину $\Delta = 2E_{\perp}l / v_e B$ и за несколько проходов покидают пучок (подробнее см. работу [4]).

Использование чистящих электродов позволяет увеличить пороговый ток пучка примерно в 1.5 раза при одном и том же давлении (рис.1,2).

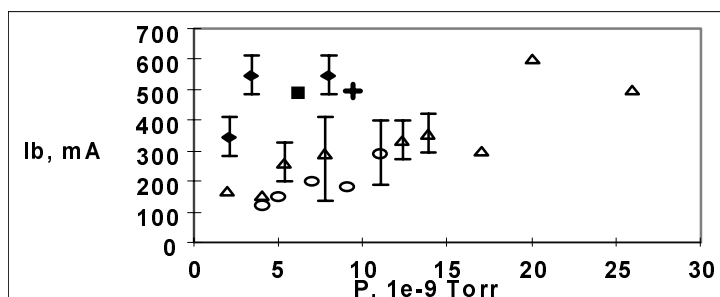


Рис.1. Зависимость порогового тока от давления остаточного газа (стенд ОИЯИ): ○ — с пробками, △ — с пробками и чистящими электродами, ■ — с пробками и разрезным управляющим электродом, ◆ — с пробками, чистящими электродами и шейкером, + — с пробками, чистящими электродами и продольной модуляцией.

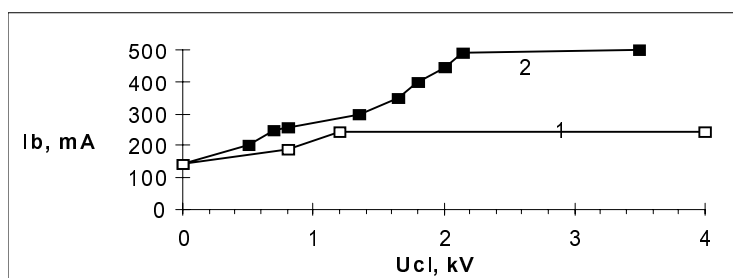


Рис.2. Зависимость порогового тока от напряжения на чистящих электродах (стенд ОИЯИ): 1 — чистящие электроды, 2 — разрезной управляющий электрод, $U_0=2.5$ кВ, $P=4-10$ нТорр, U_{cl} — напряжение между электродами.

Конструкция разрезного управляющего электрода электронной пушки принципиально та же, что и чистящих электродов, но его длина значительно меньше. Поперечное магнитное поле для компенсации смещения пучка в аноде не применяется, а необходимая коррекция осуществляется поперечным полем тех же обмоток, что и для чистящих электродов. На одну половину управляющего электрода подавалось положительное напряжение, другая половина была заземлена. Такой электрод может чистить вторичные электроны, которые колеблются между катодом и коллектором, а также внутри пушки. В результате пороговый ток возрастает в 3 раза (рис.2).

Нагрев ионов поперечным электрическим полем

Эффективным способом стабилизации пучка является также применение нагрева иона поперечным гармоническим электрическим полем с помощью “шейкера” (рис.1). Этот способ исследовался в экспериментах на системе электронного охлаждения LEAR [5] и позже на стенде ОИЯИ. Нагрев ионов приводит к увеличению порогового тока пучка, но, как оказалось, уменьшает

одновременно коэффициент нейтрализации. Нагрев переменным электрическим полем имеет диффузионный характер, так как ион проходит шейкер в случайной фазе, которая “сбивается” при каждом отражении иона от барьера несимметричной пробки. Напряжение шейкера по оценкам [5] составляет порядка 10 В, а стабилизация электронного пучка оптимальна, когда частота шейкера совпадает с некогерентной ионной частотой ω_{inc} :

$$\omega_{inc} = \sqrt{\omega_i^2(1-\eta) + \frac{\omega_B^2}{4}} - \frac{\omega_B}{2} \cong 1 \div 2.5 \text{ МГц}, \quad (2)$$

где ω_i — ионная плазменная частота; ω_B — циклотронная ионная частота. Оценка хорошо согласуется с экспериментом (рис.3). При этом пороговый ток возрастает в 3-4 раза (рис.1) при коэффициенте нейтрализации 0.4 - 0.6, значение которого падает с ростом напряжения шейкера (рис.3б).

В электронном пучке присутствуют ионы различной зарядности и атомных масс. При включении шейкера ионы с малым Z быстрее покидают пучок, так как для них потенциальный барьер поля пучка меньше. Частота колебаний ионов увеличивается с увеличением амплитуды напряжения шейкера (рис.3а), а амплитуда ионных колебаний немонотонно уменьшается. Зависимость частоты от напряжения шейкера имеет три максимума, значение каждого из которых соответствует ионной резонансной частоте для различных A/Z . При выключенном шейкере ионная частота соответствует $Z=1$. С увеличением амплитуды напряжения шейкера ионы с $Z=1$ покидают пучок, и тогда частота колебаний ионов увеличивается и соответствует некогерентной частоте ионов с $Z=2$.

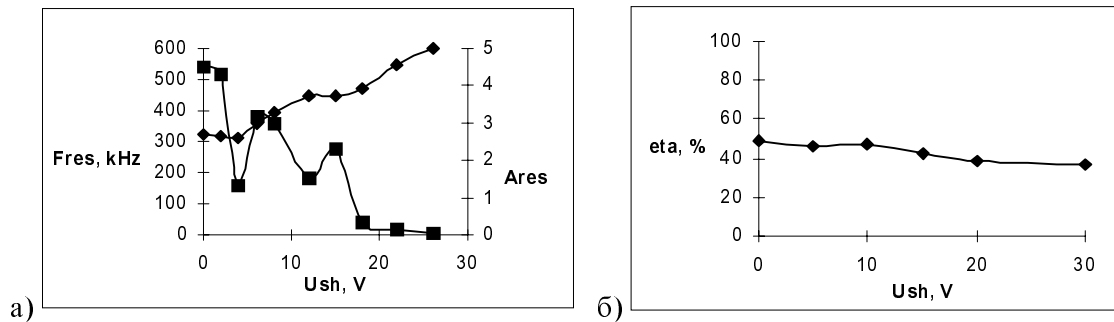


Рис. 3. Зависимость параметров спектра от амплитуды напряжения шейкера (стенд ОИЯИ): а) \blacklozenge — частота и \blacksquare — амплитуда спектрального максимума, б) коэффициент нейтрализации.

Нагрев ионов в продольном направлении

При возбуждении продольных волн в нейтрализованном пучке возрастает продольная энергия ионов, а отражение иона от пробки приводит к перераспределению энергии по всем степеням свободы. Такой нагрев ионов стабилизирует пучок, что позволяет увеличить пороговый ток. Резонансная частота генератора-модулятора определяется периодом ионных продольных колебаний:

$$f_{res} = \frac{v_{phase}}{L}, \quad v_{phase} = \frac{\omega_i \eta^{1/2} a}{2} \left(1 + 2 \ln \frac{b}{a} \right), \quad (3)$$

где v_{phase} — фазовая скорость продольной волны [1]; $L=1.7\text{м}$ — расстояние между ионными пробками; $a = 1.5\text{см}$ — радиус пучка; $b = 15\text{ см}$ — радиус вакуумной камеры. Численные оценки при $A/Z=14$ согласуются с экспериментальными результатами (рис.4).

Нагрев ионов в продольном направлении позволяет увеличить пороговый ток в 2-3 раза (рис.1).

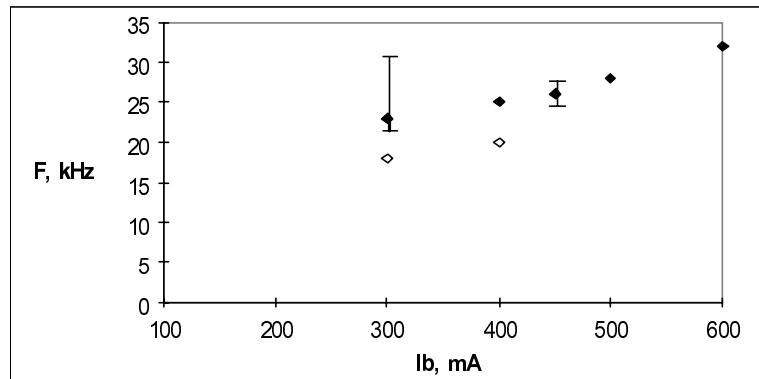


Рис.4. Зависимость частоты модуляции от тока пучка (стенд ОИЯИ):

◆ — эксперимент (амплитуда модуляции 20-40В),

◇ — расчет по формуле (3) для $A/Z=14$.

Заключение

Пучково-дрейфовая неустойчивость ограничивает ток интенсивного нейтрализованного пучка. Применение активных методов позволяет увеличить пороговый ток в 3-4 раза при нейтрализации $\eta = 0.4 - 0.7$.

Литература

- [1] А.В.Буров, В.И.Куделайнен, В.А.Лебедев, В.В.Пархомчук, А.А.Серый, В.Д.Шильцев. Экспериментальное исследование компенсированного состояния электронного пучка. Препринт ИЯФ им.Будкера 89-116 (перев. CERN PS 93-09, 1993).
- [2] J.Bosser, R.Ley, I.Meshkov, G.Molinari, V.Polyakov, A.Smirnov, E.Syresin, G.Tranquille, F.Varenne. Electron Cooling with Neutralised Electron Beams. Europ.Part.Acc.Conf. 1994, London, p.1211.
- [3] Bosser J., Lapik R., Ley R., Meshkov I., Poljakov V., Seleznev I., Smirnov A., Syresin E., Zapunjako A., Zavrazhnov M. The Variable Current Gun: the Parameter Tests and the Results of the First Electron Cooling Experiments at LEAR. Nucl.Instr. and Meth., A355, 1995, pp.208-222.
- [4] E. Syresin, The Parameters of the Secondary Electrons in the Electron Cooling System, C&D workshop, 1996. (Nucl.Instr. and Meth., в печати).
- [5] J.Bosser, F.Caspers, R.Ley, R.Maccafferri, S.Maury I.Meshkov, G.Molinari, V.Polyakov, A.Smirnov, O.Stepashkin, E.Syresin, G.Tranquille, F.Varenne. Neutralisation of the LEAR Electron Cooling Beam: Experimental Results. Intern.Part.Acc.Conf., 1995, Dallas; CERN PS/AR 95-17, 1995.