

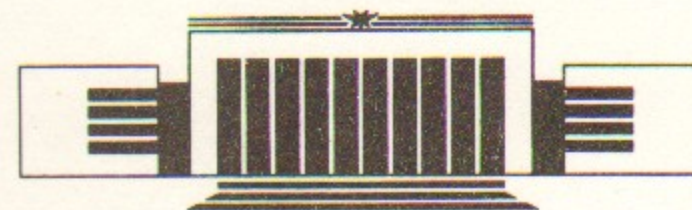


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

В.И. Давыденко, И.И. Морозов

СТАБИЛИЗАЦИЯ
ТЕПЛОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ
МНОГОЩЕЛЕВОЙ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ
ПРОДОЛЬНЫМ НАТЯЖЕНИЕМ

ПРЕПРИНТ 91-76



НОВОСИБИРСК

Стабилизация тепловой неустойчивости электродов
многощелевой ионно-оптической системы
продольным натяжением.

В. И. Давыденко, И. И. Морозов.

Аннотация

Предложена термоупругая модель отдельного электрода многощелевой ионно-оптической системы, позволяющая определить область устойчивости. Рассмотрены вопросы стабилизации тепловой неустойчивости продольным натяжением электродов для ионно-оптической системы квазистационарного протонного источника ИК-50.

Стабилизация тепловой неустойчивости
электродов многощелевой ионно-оптической
системы продольным натяжением.

В. И. Давыденко, И. И. Морозов.

Для получения интенсивных пучков быстрых атомов изотопов водорода перезарядным методом с целью их инжекции в магнитные ловушки применяются ионные источники с электростатическим извлечением ионов из газоразрядной плазмы. Используемые в этих источниках трех- и четырехэлектродные ионно-оптические системы позволяют получать пучки ионов в сотни килоэлектронвольт, током до 100 ампер, угловой расходимостью $0,5^{\circ}$ - 3° , длительностью импульса до нескольких десятков секунд. Достижение столь высоких токов основано на переходе к многоапертурным ионно-оптическим системам, формирующим пучок состоящий из многих (до 10^3) элементарных пучков, извлекаемых в отдельных элементарных ячейках. Используются два наиболее технологичных типа апертур: круглые отверстия и длинные прямые щели. Многощелевые ионно-оптические системы имеют повышенную прозрачность и, по нашему мнению, более просты в изготовлении. При экспериментальных исследованиях и эксплуатации ионных источников с многощелевыми ионно-оптическими системами иногда наблюдается тепловая неустойчивость электродов. Эта неустойчивость приводит к значительному отклонению отдельного электрода в сторону элементарного пучка и проявляется в резком возрастании тока на этот электрод и потере электрической прочности, вызванной нагревом попавшей под пучок части электрода. Механизм тепловой неустойчивости состоит в том, что при случайном смещении электрода в сторону элементарного пучка обращенная к

пучку сторона электрода нагревается сильнее и вследствие теплового расширения смещение электрода возрастает. В настоящем сообщении предложена термоупругая модель, позволяющая определить область устойчивости и рассмотрены вопросы стабилизации тепловой неустойчивости электрода продольным натяжением.

Рассмотрим поведение отдельного элементарного электрода, для определенности, ускоряющей сетки, расположенного между двумя элементарными пучками (рис. 1). В статическом состоянии форма

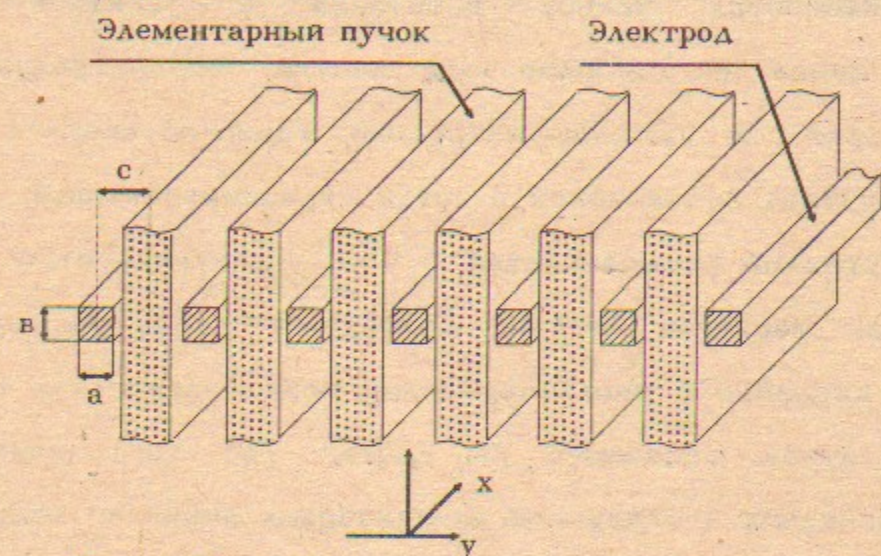


Рисунок 1. Расположение электродов ускоряющей сетки многослойной ионно-оптической системы.

прогиба электрода определяется равновесием момента сил внутренних напряжений изгиба, термоупругого момента сил, момента силы продольного натяжения и момента сил концевых опор. В предположении, что электрод является тонким стержнем и градиент температуры постоянен поперек электрода, прогиб электрода определяется уравнением [1]:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -\alpha EI \frac{\partial T}{\partial y} + Fy + M_0,$$

где E - модуль упругости, I - момент инерции, α - коэффициент линейного расширения, F - сила продольного натяжения, M_0 - момент сил концевых опор.

Поперечный градиент температуры $\frac{\partial T}{\partial y}$ связан с тепловым потоком через среднее поперечное сечение электрода следующим образом: $-\alpha \frac{\partial T}{\partial y} b = J$, где α - коэффициент теплопроводности, b - размер электрода вдоль пучка, J - тепловой поток на единицу длины через среднее сечение электрода. При симметричном расположении электрода тепловой поток через среднее сечение отсутствует. Смещение электрода приводит к появлению разности тепловых нагрузок на левую и правую половины электрода и возникновению поперечного градиента температуры. Тепловая нагрузка электродов ионно-оптической системы в основном обусловлена двумя причинами: попаданием частиц пучка и потоками вторичных частиц. При оптимальном формировании пучка, соответствующему слегка вогнутой плазменной границе, частицы пучка проходят мимо электродов, и зазор между границей пучка и ускоряющим электродом составляет $\sim 0,3c$, где c - полуширина элементарной ячейки (рис. 1.). В этом случае тепловая нагрузка на электроды приносится вторичными частицами - вторичными ионами, образующимися при перезарядке быстрых ионов пучка, вторичными ионами из нейтрализатора и вторично-эмиссионными электронами. Подробный анализ потоков вторичных частиц в элементарной ячейке ионно-оптической системы приведен в обзоре [2]. Плотность потоков вторичных частиц пропорциональна плотности газа в ионно-оптической системе. Полная мощность, содержащаяся в потоках вторичных частиц, относительно невелика и составляет $\sim 5\%$ от полной мощности пучка. Плотность переносимой потоками вторичных частиц мощности возрастает при приближении к пучку [2]. Для простоты применим линейную аппроксимацию этой плотности мощности - $w(y) \approx 0,1w_b \frac{|y|}{c}$, где w_b - средняя плотность мощности пучка. При отклонении первеанса пучка от оптимального форма плазменной границы меняется, что приводит к изменению траекторий частиц пучка. Превышения первеанса пучка на 10-15 % достаточно для того, чтобы граница пучка вплотную

приблизилась к ускоряющему электроду. При этом плотность мощности вблизи электрода резко возрастает и оценивается следующим образом $w(y) \approx 2w_b \frac{|y|}{c}$. Таким образом, плотность мощности вблизи ускоряющего электрода можно представить в виде $w(y) = Kw_b \frac{|y|}{c}$, где коэффициент K в зависимости от формирования пучка может меняться в пределах от $K_{\min} = 0,1$ до $K_{\max} = 2$. Тогда малое смещение электрода в направлении пучка на величину y приведет к появлению разности тепловых потоков между половинами электрода $J = -Kw_b y \frac{a}{c}$, где a - поперечный размер электрода. При этом возникает поперечный градиент температуры $\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{Kw_b y a}{\alpha bc}$ и уравнение для изгиба электрода принимает вид:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = (F - \frac{K\alpha EI w_b a}{\alpha bc}) y + M_0.$$

Аналогичным уравнением описывается изгиб тонкого стержня под действием продольной силы $F^* = F - \frac{K\alpha EI w_b a}{\alpha bc}$. Действие термоупругих напряжений в данном случае аналогично действию продольной сжимающей силы и поэтому эффективная сила F^* может быть как растягивающей, так и сжимающей. Известно, что для тонкого стержня существует критическая продольная сила сжатия, при достижении которой появляется неустойчивость поперечного изгиба (неустойчивость Эйлера). Итак, условие развития тепловой неустойчивости электродов выражается в виде $F^* < F_1$, где F_1 - критическая продольная сила сжатия.

Рассмотрим ситуацию для ионно-оптической системы квазистационарного протонного источника ИНАК [3], при испытании и эксплуатации которого наблюдалась тепловая неустойчивость. Электроды ионно-оптической системы ИНАК представляют собой молибденовые проволоки диаметром 1 мм, длиной $l = 15$ см, установленные с шагом $2c = 3$ мм. Электроды уложены в профрезерованные в обечайках пазы и имеют возможность свободного расширения, что соответствует отсутствию продольной силы: $F = 0$. Пазы для электродов имеют длину 5 мм и при зазоре $1^{+0,02}$ мм угол

свободного покачивания электрода составляет $\sim 10^{-2}$ рад, то есть вплоть до этого угла момент сил концевых опор отсутствует: $M_0 = 0$ и торцы электродов являются свободно опертыми. Критическая сила сжатия для стержня со свободно опертыми торцами: $y(0) = y(l) = 0$ составляет [4]: $F_1 = -\pi^2 \frac{EI}{l^2}$, а форма прогиба описывается кривой $y(x) = C \sin \frac{\pi x}{l}$, где C - неопределенная константа. Таким образом, электрод ионно-оптической системы становится неустойчивым относительно поперечного изгиба при условии: $\frac{K\alpha w_b a}{\alpha bc} > \frac{\pi^2}{l^2}$. Средняя плотность мощности пучка в источнике ИНАК составляет $w_b \approx 5$ кВт/см², и после подстановки соответствующих значений для коэффициента K имеем оценку: $K_{\text{crit}} = \frac{\pi^2 \alpha bc}{l^2 \alpha w_b a} \approx 0,4$. Полученное значение находится в диапазоне $K_{\min} < K_{\text{crit}} < K_{\max}$ и соответствует развитию неустойчивости при неоптимальном формировании пучка, что согласуется с экспериментальными наблюдениями. Критическая сила сжатия стержня с заделанными торцами в 4 раза больше, чем у стержня со свободно опертыми торцами, поэтому заделка торцов электрода увеличивает K_{crit} в 4 раза. Другая возможность увеличения K_{crit} состоит в использовании силы продольного натяжения. Для полного исключения тепловой неустойчивости достаточно силы продольного натяжения $F = \left(\frac{K_{\max}}{K_{\text{crit}}} - 1 \right) \frac{\pi^2}{l^2} EI \approx 20$ Н.

В начальном положении электрода тепловая нагрузка может быть несимметричной, например, вследствие неточной юстировки или при расположении электрода вблизи края пучка. Возникающий при этом термоупругий момент сил приводит к поперечному смещению электрода, в результате чего появляется компенсирующий момент продольной силы. Пусть несимметричная часть тепловой нагрузки составляет $J = 0,05w_b a$, при этом появляется поперечный градиент температуры $\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{J}{\alpha b}$ и возникает термоупругий момент сил $M_T = \alpha EI \frac{\partial T}{\partial y}$. Величина поперечного смещения электрода, достаточная для компенсации

термоупругого момента сил моментом продольной силы составляет $\delta y \approx \frac{M_I}{F} = \frac{0,05\alpha EI w a}{2bF}$. Для средней плотности мощности пучка $w_b \approx 5 \text{ кВт/см}^2$ и силы продольного натяжения $F=50 \text{ Н}$ поперечное смещение молибденового электрода диаметром 1 мм оценивается величиной $\delta y = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ мм}$, которая является достаточно малой и не приводит к заметному угловому отклонению пучка [2].

Стабилизация тепловой неустойчивости электродов продольным натяжением экспериментально осуществлена в ионно-оптической системе ионного источника ИК-50 [5] предназначенного для получения пучков ионов дейтерия с энергией 30 кэВ и током 50 А. Формирование ионного пучка в источнике ИК-50 осуществляется многощелевой четырехэлектродной ионно-оптической системой, в которой щелевая структура электродов образована отоженными в вакууме молибденовыми проволоками диаметром 1мм, установленными с шагом 3 мм. Для стабилизации тепловой неустойчивости электроды натягиваются с помощью плоских пружин. На рисунке 2 показана схема натяжения

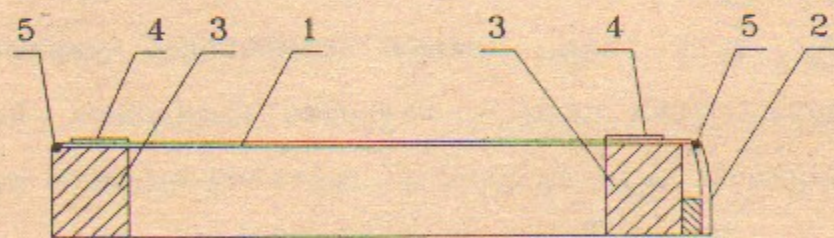


Рисунок 2. Схема натяжения электродов в ионно-оптической системе источника ИК-50.
1- электрод, 2- плоская пружина, 3- рама, 4- выступ с пазами, 5- места точечной сварки.

электродов. Один конец электрода приваривается точечной сваркой к плоской пружине, закрепленной на прямоугольной раме из нержавеющей стали, другой конец - непосредственно к раме. Для обеспечения

необходимой точности юстировки электродов $\pm 0,02 \text{ мм}$ на раме предусмотрен выступ, в котором с точностью 2 мкм профрезерованы пазы шириной $1^{+0,01} \text{ мм}$, допускающие продольное движение электродов. Плоские пружины представляют собой две гребенки, изготовленные из специальной стали толщиной 2 мм, элементы гребенки имеют ширину 3 мм, шаг 6 мм. Гребенки устанавливаются с двух сторон рамы со сдвигом 3 мм, что позволяет обеспечить шаг установки электродов 3 мм за счет поочередного закрепления. Отдельный элемент пружины имеет высоту 25 мм, отогнут на 2 мм и натягивает электрод с силой 100 Н. Экспериментально измеренный предел текучести электродов составляет 200 Н и превышает силу натяжения в 2 раза. При возможном во время работы ионного источника нагреве до 100° С удлинение электрода составит 0,1 мм и сила натяжения электрода пружиной уменьшится на 5%. В соответствии с проведенным рассмотрением используемая сила продольного натяжения электродов достаточна для стабилизации тепловой неустойчивости. В ходе испытаний источника ИК-50 на экспериментальном стенде тепловая неустойчивость электродов не наблюдалась.

Авторы выражают благодарность Г.И. Димову за полезные обсуждения, А.А. Лифшицу и Д.И. Павленко за конструкторское проектирование, П.А. Журавлеву за сборку и юстировку ионно-оптической системы.

Литература:

1. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. -М: Мир, 1964, 517 с.
2. Грин Т. В сб. Прикладная физика атомных столкновений. Плазма - М.: Энергоатомиздат, 1987, с. 276.
3. Давыденко В.И., Морозов И.И., Росляков Г.В., Савкин В.Я. ПТЭ, 1986, N 6, с. 39.

В.И.Давыденко, И.И.Морозов

4. Ван Цзи-де. Прикладная теория упругости. - М.: Физматгиз, 1959, 400 с.
5. Dimov G.I., Morozov I.I. Rev. Sci. Instr., 1990, N 1(II)

СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ
МНОГОЩЕЛЕВОЙ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОДОЛЬНЫМ
НАТЯЖЕНИЕМ

Препринт 91-76

Работа поступила 19 июля 1991 года

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Подписано к печати 24 июля 1991 г.

Формат бумаги 60x90 1/16. Объем 0,8 печ.л., 0,7 уч.-изд.л.

Тираж 220 экз. Бесплатно. Заказ № 76

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск-90