

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

1577/2-80

7/4-80

P9 - 12940

В.Д.Инкин, А.А.Мозелев, В.П.Саранцев

СИСТЕМА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ
ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫХ КОЛЕЦ
НА КОНЕЧНОМ ЭТАПЕ СЖАТИЯ
В АДГЕЗАТОРЕ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ПО ТОРМОЗНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

1980

В коллективном ускорителе тяжелых ионов с электронными кольцами^{/1/} накопление ионов происходит за счет ионизации электронным ударом нейтральных атомов остаточного газа или нейтральных атомов, попавших в объем кольца из импульсной газовой струи. Образовавшиеся ионы удерживаются внутри электронного кольца его электрическим полем и ускоряются вместе с ним. Для настройки ускорителя и проведения физических экспериментов необходимо оперативное измерение числа электронов N_e и ионов N_i в кольце на конечном этапе сжатия, желательного в каждом цикле работы ускорителя. Известные методы измерения числа ионов по выходу вторичных продуктов ядерных реакций^{/2/} и вторично-электронной эмиссии^{/3/} имеют общий недостаток - электронно-ионный сгусток разрушается при попадании на один из элементов измерительного устройства.

Для исследования процесса накопления ионов без разрушения электронно-ионного кольца предложена методика на основе регистрации характеристического рентгеновского излучения ионов^{/4/}, позволяющая в принципе определять как зарядность ионов, так и их полное число. Однако этот способ не пригоден для индикации ионов легких и средних элементов из-за малой энергии характеристического излучения, а также требует усреднения по многим циклам ввиду малой статистики, что лишает его оперативности.

В данной работе предлагается метод, сущность которого заключается в том, что регистрируется тормозное излучение электронов, возникающее при их взаимодействии с кулоновским полем ядер ионов. Поскольку ионы удерживаются внутри электронного кольца, то их плотность в конце процесса накопления существенно превосходит плотность нейтральных атомов остаточного газа^{/5/} /на 2-3 порядка/. Вследствие этого можно судить о числе накопленных ионов, измеряя интенсивность тормозного излучения электронов на конечном этапе сжатия электронно-ионных колец в адгезаторе коллективного ускорителя тяжелых ионов.

Ввиду большой энергии электронов /15-20 МэВ/ и невысокой зарядности ионов экранировкой кулоновского поля ядра электронными оболочками можно пренебречь^{/6/}, так что интенсивность тормозного излучения не зависит от зарядности ионов.

Вкладом в тормозное излучение электронов на ионах тормозного излучения электронов, попадающих на стенки камеры адгезатора в результате упругого рассеяния электронов кольца, как было показано в работе^{/7/}, можно также пренебречь, тем более, что энергия электронов в данном случае на порядок больше, чем в^{/7/}.



Аппаратура, регистрирующая тормозное излучение электронов на ионах, выполнена в стандарте КАМАК и работает на линии с ЭВМ ТРА-і. Это позволяет в течение цикла ускорителя, длительность которого равна 2 с, произвести считывание, обработку и вывод информации о числе ионов и электронов в кольце. При изменении режима работы ускорителя производится коррекция программы обработки информации путем введения с телетайпа измененных параметров. Для работы с аппаратурой КАМАК используется расширенный вариант языка ФОКАЛ^{8/}.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Измерение тормозного излучения электронов производилось с помощью однокристалльного γ -спектрометра с кристаллом NaI(Tl), находившегося в свинцовой защите.

Блок-схема системы приведена на рис. 1. С фотоэлектронного умножителя /ФЭУ/ сигналы поступают на вход дискриминатора. С выхода дискриминатора сигнал подается на вход стробируемого счетчика типа КС-012. Сигнал запуска III ступени сжатия с амплитудой 30 В поступает на вход преобразователя типа 053, который преобразует его в сигнал в стандарте NIM. Затем импульс достигает входа управляемой задержки типа 051. Диапазон регулировки задержки составляет $2^{16} - 1 / 0,1$ мкс с шагом 0,1 мкс. Задержанный импульс поступает на вход одного из четырех таймеров модуля КАМАК типа 312, который выполняет роль формирователя стробирующего импульса длительностью 200 мкс. Далее он подается на соответствующий вход счетчика. Временная диаграмма приведена на рис. 16.

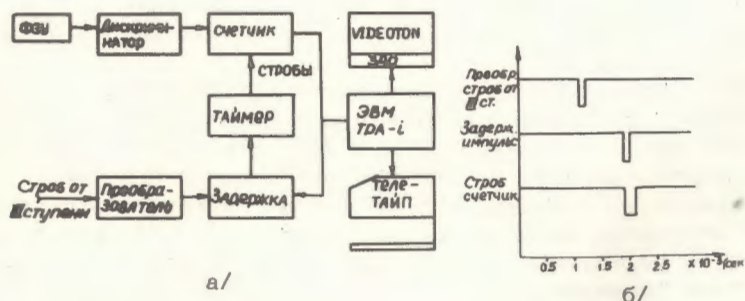


Рис. 1. а/ Блок-схема системы измерения произведения числа ионов и электронов на конечном этапе сжатия в адгезаторе КУТИ по тормозному излучению, б/ временная диаграмма.

Информация из счетчика передается в ЭВМ ТРА-і после прихода сигнала LAM. Сигнал LAM вырабатывается модулем КАМАК типа КС-012 после прихода стробирующих импульсов на входы I и II при отключенных счетчиках III и IV, поэтому на вход счетчика II подается короткий импульс с "задержанного" выхода таймера. Далее полученная со счетчика информация обрабатывается и расчетное $N_e \cdot N_i$ выводится на телетайп или дисплей VT-340.

ПРОГРАММА ОБРАБОТКИ

Для повышения точности вычислений $N_e \cdot N_i$ - произведения числа ионов и электронов в кольце по измеренной интенсивности тормозного излучения программа обработки была разбита на две части. Сначала производилось вычисление интегрального значения сечения тормозного излучения электронов с учетом экспериментальных значений эффективности регистрации

$$\epsilon(E_\gamma, E_H): E_e \int_{E_H} \epsilon(E_\gamma, E_H) d\Phi(z_0, E_\gamma), \quad /1/$$

где E_H - энергия, соответствующая уровню дискриминации, E_e - энергия электронов, $d\Phi(z_0, E_\gamma)$ - дифференциальное сечение тормозного излучения^{9/} электронов:

$$d\Phi(z_0, E_\gamma) = \frac{4z_0^2}{137} r_e^2 \left\{ \left[1 + \left(1 - \frac{E_\gamma}{\gamma}\right)^2 - \frac{2}{3} \left(1 - \frac{E_\gamma}{\gamma}\right) \right] \ln(183 z_0^{-1/3}) + \frac{1}{9} \left(1 - \frac{E_\gamma}{\gamma}\right) \right\}, \quad /2/$$

где z_0 - заряд ядра иона, r_e - классический радиус электрона, E_γ и γ - соответственно энергия γ -кванта и электрона в единицах mc^2 . График зависимости интегрального сечения тормозного излучения электронов, с учетом эффективности регистрации $\Phi(z_0)$, от E_H для азота ($z=7$) показан на рис. 2. Блок-схема второй части программы обработки приведена на рис. 3. Управляемой задержкой устанавливается временное положение стробирующего импульса в зависимости от режима работы ускорителя. После выработки счетчиком сигнала LAM информация из счетчика считывается ЭВМ и далее производится расчет произведения, связанного с N_γ -интенсивностью тормозного излучения электронов, с помощью следующей формулы:

$$N_\gamma = c \cdot r \cdot N_e \cdot \frac{N_i}{V} \cdot \Phi(z_0) \cdot G. \quad /3/$$

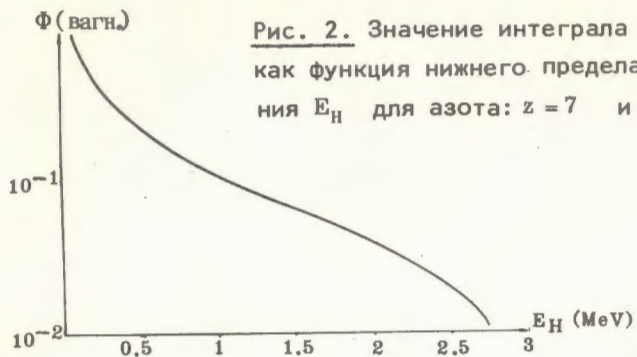


Рис. 2. Значение интеграла от $d\Phi(z_0, E_\gamma)$ как функция нижнего предела интегрирования E_H для азота: $z = 7$ и $\gamma = 30$.

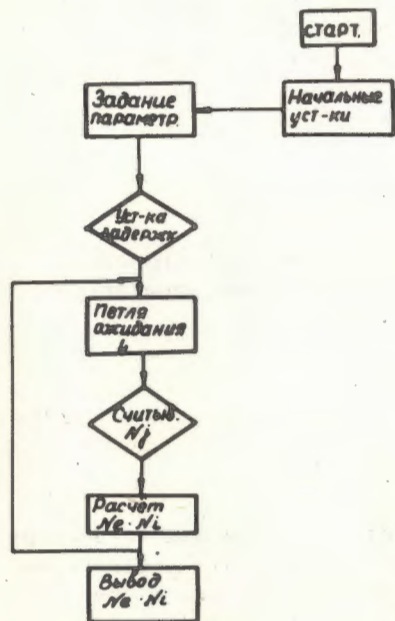
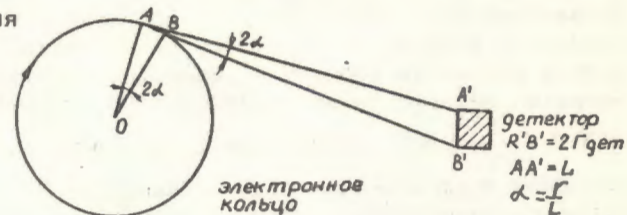


Рис. 3. Блок-схема программы измерения $N_i N_e$.

где c - скорость света, τ - время измерения, равное длительности строба счетчика, V - объем электронно-ионного кольца $^{10/}$, G - геометрический фактор регистрации тормозного излучения, который определяется тем, что при энергии электронов $E \gg mc^2$ тормозное излучение сосредоточено почти все в конусе с раствором $\theta = \frac{1}{\gamma}$ и что при вращении электронов по орбите в апертуру детектора попадает часть полного потока

излучения за один оборот, определяемая положением детектора. Следовательно, геометрический фактор можно представить в виде произведения $G(\alpha, \gamma) = G_1 \cdot G_2$, где G_1 - величина, определяющая, какая часть γ -квантов от полного количества, излучаемого кольцом за один оборот, попадает в детектор. Как видно из рис. 4, $G_1 = \frac{\alpha}{\pi}$, где $\alpha = \frac{r}{L}$, r - радиус апертуры

Рис. 4. Геометрия эксперимента.



детектора, L - расстояние от точки излучения до центра детектора. G_2 есть отношение телесных углов: $G_2 = \left(\frac{\Delta\Omega_{\text{дет}}}{\Delta\Omega_{\text{изл}}} \right)$, где $\Delta\Omega_{\text{дет}} = \pi a^2$, $\Delta\Omega_{\text{изл}} = \beta \cdot 4\pi \sin^2 \frac{\theta}{2} = \frac{\beta\pi}{\gamma^2}$. Коэффициент β возникает за счет учета углового разброса вектора скорости электронов в сжатом кольце в радиальном направлении ϕ_r и аксиальном ϕ_z :

$$\phi_{r,z} = \nu_{r,z} \frac{a_{r,z}}{R} \quad /4/$$

где $\nu_r = \sqrt{1-n}$, $\nu_z = \sqrt{n}$, n - показатель спада магнитного поля, $a_{r,z}$ - соответственно радиальный и аксиальный размеры сечения кольца. С учетом этих параметров G_2 определяется как

$$G_2 = \frac{\pi a^2}{4(\phi_r + \frac{1}{\gamma})(\phi_z + \frac{1}{\gamma})} = \frac{\pi a^2}{4(\phi_r \phi_z + \frac{1}{\gamma}(\phi_r + \phi_z) + \frac{1}{\gamma^2})} \quad /5/$$

Таким образом, полная геометрическая эффективность определяется выражением

$$G = \frac{a^3}{4(\nu_r \nu_z \frac{a_r a_z}{R^2} + \frac{1}{\gamma} (\frac{\nu_r a_r}{R} + \frac{\nu_z a_z}{R} + \frac{1}{\gamma^2}))} \quad /6/$$

Далее расчетное $N_i N_e$ выводится на телетайп или дисплей VT-340, а программа возвращается в место ожидания LAM сигнала и цикл повторяется.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОЦЕНКА ОШИБКИ

Минимальная регистрируемая системой измерения величина произведения на конечном этапе сжатия в адгезаторе КУТИ составляет $5 \cdot 10^{22}$. Для случая накопления ионов из остаточного газа она находилась в пределах $/8 \pm 3/ \cdot 10^{23}$. Ускоритель работал в режиме вывода, давление остаточного газа в камере адгезатора было равно $\approx 7 \cdot 10^{-8}$ Тор. Оценка ошибки производилась по анализу погрешности, даваемой компонентами, входящими в расчетную формулу^{/3/}. Измеренная интенсивность N_γ подчиняется распределению Пуассона, и относительная ошибка

$$\delta(N_\gamma) = \frac{1}{\sqrt{N_\gamma}} \leq 12\%.$$

Возникающая из-за погрешности в геометрическом моделировании относительная ошибка $\delta(G) \leq 10\%$. Относительная ошибка, полученная из-за погрешности при расчете сечения тормозного излучения, $\delta(\Phi(z_0)) \leq 10\%$. Возникающая из-за погрешности при расчете объема кольца относительная ошибка $\delta(V) \sim 7-8\%$.

Все это дает основание сделать вывод, что общая относительная ошибка системы измерения величины произведения $N_i N_e$ на конечном этапе сжатия электронно-ионных колец в адгезаторе $\delta(N_i \cdot N_e) \leq 40\%$.

Остальные компоненты существенного вклада в ошибки не вносят.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить В.А.Свиридова за полезные советы и обсуждения, С.И.Тютюникова за помощь в работе, В.С.Александрова, Ю.И.Алексахина и Г.Д.Ширкова за предоставленные расчеты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Векслер В.И. и др. ОИЯИ, Р9-3440-2, Дубна, 1968.
2. Долбилов Г.В. и др. ОИЯИ, Р9²11191, Дубна, 1978.
3. Энгель А. Ионизованные газы. ИЛ., М., 1959, с.98.
4. Зиберт Х.-У. и др. ОИЯИ, Р9-9366, Дубна, 1975.
5. Перельштейн Э.А., Ширков Г.Д. ОИЯИ, Р9-11412, Дубна, 1978.
6. Koch H.W., Motz J.W. Rev. of Mod. Phys., 1959, v.31, p.924.
7. Инкин В.Д. и др. ОИЯИ, Р9-12725, Дубна, 1979.
8. Ангелов А.Х., Дубовик Л.В. ОИЯИ, 10-9493, Дубна, 1976.
9. Иовнович М.Л. и др. ОИЯИ, Р9-4850, Дубна, 1970.
10. Саранцев В.П. и др. ОИЯИ, Р9-10917, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 ноября 1979 года.