

объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
дубна

5515/2-81

9/11-81  
P13-81-569

С.Н.Доля, В.А.Свиридов, В.П.Токарский

ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЕ  
ДЛЯ КАЛОРИМЕТРИИ ПУЧКА ИОНОВ

*Направлено в ПТЭ*

1981

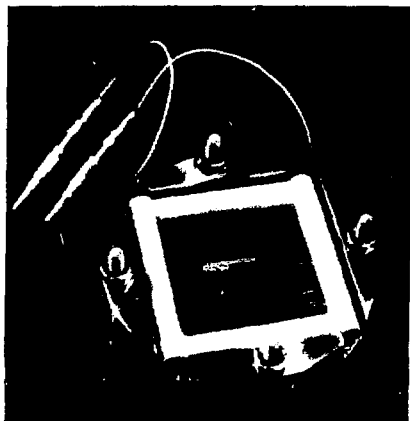


Рис. 1

В качестве термосопротивления выбран вольфрам. У вольфрама высокая температура плавления /по этой характеристике он уступает только углероду/, что обеспечивает прибору большой динамический диапазон. Вольфрамовая нить имеет преимущества перед углеродной по технологическим параметрам и коммерчески доступна в широком ассортименте толщин.

Инерционность прибора обеспечивает измерениям высокую помехозащищенность от электромагнитных наводок. Малая толщина чувствительного материала приводит к сильному подавлению фона от  $\gamma$ -квантов и релятивистских электронов.

Прибор разработан для калориметрии пучков медленных ионов с энергией ниже порога ядерных реакций. Однако он может быть полезен и для решения более широкого круга задач, например, для измерения потоков быстрых /релятивистских/ частиц с известной величиной ионизационных потерь энергии в вольфрамовой нити.

Для того, чтобы калориметр имел максимальную чувствительность, диаметр проволоки выбирается близким к длине пробега ионов /обычно это десятки микрон для низкоэнергетических ионов/. Калориметр измеряет поглощенную энергию, для определения кинетической энергии требуется независимое измерение тока пучка.

Ниже рассматривается ионный калориметр, представляющий собой термосопротивление из тонкой проводящей нити, намотанной на рамку /см. рис. 1/ и поглощающей часть пучка. Кинетическая энергия ионов преобразуется в нити в тепловую, в результате чего происходит нагрев и изменение сопротивления рамки. Калориметр имеет малую массу, поэтому чувствительность его высока. Регистрация изменения температуры по изменению сопротивления удобна для многих приложений.

Поглощение в рабочем теле калориметра энергии  $Q$  приводит к изменению его температуры  $\Delta T = Q/c$  /где  $c$  - теплоемкость нити/, которое, в свою очередь, вызовет относительное изменение сопротивления  $\Delta R/R = \alpha \Delta T$ , где  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления. Это изменение сопротивления может быть измерено соответствующими способами - цифровыми, мостовыми, осциллографическими и т.п.

## ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Ионный калориметр использовался для измерений как импульсных, так и непрерывных пучков. В первом случае изменение температуры калориметра описывается уравнением /основной канал отвода тепла - излучение/

$$c \frac{dT}{dt} = -\epsilon_T \sigma T^4 s, \quad /1/$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/см}^2 \text{ град}$  - постоянная Стефана-Больцмана,  $s$  - площадь боковой поверхности проволок рамки,  $\epsilon_T$  - интегральный коэффициент черноты, определенный как отношение полной интенсивности излучения реального тела к полной интенсивности излучения абсолютно черного тела, взятых при одной и той же температуре.

Решение уравнения /1/ может быть записано в виде

$$T = \frac{T_0}{\sqrt[3]{1 + 3 \epsilon_T / c \cdot \sigma s T_0^3 t}}, \quad /2/$$

где  $T_0$  - начальная температура калориметра. Из /2/ следует, что время  $t$ , за которое температура упадет в 1,25 раза, для температуры 2000 К составляет 10 с.

При работе калориметра в режиме непрерывного экспонирования /когда интервал времени между очередными посылками пучка много меньше характерного времени остывания калориметра/ соотношение между сопротивлением калориметра и мощностью пучка может быть получено из условия равенства поглощаемой и излучаемой энергии

$$p = \sigma s \epsilon_T (T^4 - T_0^4). \quad /3/$$

Подставляя в /3/ выражение для температуры  $T$  через сопротивление калориметра

$$T = T_0 + \frac{R_K - R_H}{\alpha R_H}, \quad /4/$$

где  $R_K$  и  $R_H$  - конечное и начальное значения сопротивления, получим после несложных преобразований искомую связь

$$p = \sigma \epsilon_T T_0^4 G \left[ \left( 1 + \frac{R_k - R_n}{\alpha T_0 R_n} \right)^4 - 1 \right], \quad (15)$$

где коэффициентом  $G$  учтена прозрачность рамки.

Ограничение на использование калориметра - термосопротивления для измерений непрерывных пучков накладывает требование постоянной плотности пучка по всей площади калориметра. Если же поток ионов неравномерен по площади, для правильной расшифровки показаний прибора необходимо измерение распределения пучка по сечению рамки.

Исследование калориметра проведено на пучках ускорителей, позволяющих получать отдельные импульсы заряженных частиц /линейный индукционный ускоритель электронов ЛИУ-3000<sup>/1/</sup>, линейный ускоритель ионов ЛУ-20<sup>/2/</sup> / и квазинепрерывный пучок ионов /циклотрон У-300<sup>/3/</sup> /. Параметры испытанных калориметров приведены в таблице.

Таблица

Параметры испытанных калориметров

	Сопротив- ление, Ом	Диаметр проволок, мкм	Длина, см	Масса, мг	Теплоем- кость, мДж/град.
ионы азота, неона	110	50	363	140,4	19,35
электроны 1,5 МэВ	2730	20	1444	87,6	12,45
$\alpha$ -частицы, дейтроны	1200	20	634	38,4	5,46

В измерениях на ЛИУ-3000<sup>/1/</sup> использовались электроны с энергией 1,5 МэВ. Каждый электрон терял при прохождении проволоки /по диаметру/ энергию 80 кэВ. Число электронов в импульсе было равно  $N_e = 3 \cdot 10^{14}$ . Расчетное значение скачка температуры проволоки  $\Delta T = 41^\circ\text{C}$ , соответственно изменение сопротивления

$\frac{\Delta R}{R} = \alpha \Delta T$  составляло 0,1. Здесь  $\alpha$  - коэффициент температурного изменения сопротивления. Измеренное значение  $\alpha$  равно  $2,7 \cdot 10^{-8}$  град<sup>-1</sup>.

Для визуализации изменения сопротивления через калориметр пропускался постоянный ток  $J = 1$  мА, который на сопротивлении калориметра развивал напряжение  $U \approx 3$  В. Изменение сопротивле-

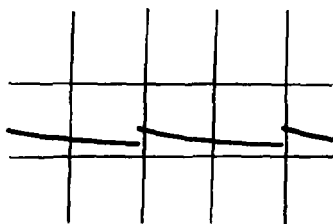
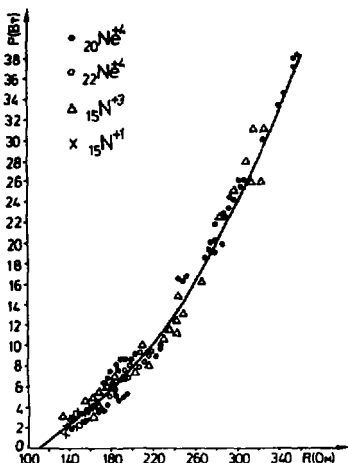


Рис. 2

Рис. 3



ния вследствие нагрева приводило к изменению напряжения на калориметре, которое регистрировалось осциллографом.

На рис. 2 приведена соответствующая осциллограмма, скорость развертки - 5 с/дел., масштаб по вертикали - 1 В/дел. Из осциллограммы видно, что измеренное относительное увеличение сопротивления ( $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta U}{U} = 0,1$ ) и время остывания близки к расчетным.

Испытания калориметра проводились также на линейном ускорителе ЛУ-20<sup>2/</sup> в пучках  $\alpha$ -частиц и дейтронов с энергией 5 МэВ/нукл. Калориметр показал хорошую линейную зависимость от амплитуды тока пучка и длительности импульса. Измеренные значения изменения сопротивления близки к расчетным.

На рис. 3 приведена полученная на циклотроне У-300<sup>18/</sup> зависимость сопротивления рамки от мощности пучка ионов. Все измерения проводились на конечном радиусе  $R=137$  см при фиксированной энергии ионов: 16 МэВ ( ${}_{15}N^{+1}$ ), 160 МэВ ( ${}_{15}N^{+3}$ ), 200 МэВ ( ${}_{20}Ne^{+4}$ ), 180 МэВ ( ${}_{22}Ne^{+4}$ ). Цель измерений - определение зависимости показаний калориметра от атомного веса, зарядности и энергии иона. Ток пучка регулировался ионным источником в диапазоне от десятков до тысяч наноампер и измерялся расположенным за калориметром цилиндром Фарадея. Из рис. 3 видно, что нагрев рамки определяется только мощностью пучка и не зависит от атомного веса и зарядности ионов. По мере увеличения мощности пучка линейный рост сопротивления переходит

в параболу четвертого порядка в соответствии с формулой /5/. Небольшой разброс точек на кривой рис.3 объясняется тем, что ток ускорителя "плавает", в то время как инерционность калориметра высока /формула /2//.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый калориметр прошел экспериментальную проверку на непрерывных и импульсных пучках. Ошибка измерений определяется в основном точностью измерения сопротивления рамки и тока пучка и составляет ~10%.

В заключение авторы выражают свою глубокую благодарность дежурным смен ускорителей ЛИУ-3000, У-300 и ЛУ-20 за помощь в проведении измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анацкий А.И. и др. АЭ, 1966, 21, с.439.
2. Попов В.А. ОИЯИ, 9-11835, Дубна, 1978.
3. Вялов Г.Н. "Природа", 1966, 10, с.42.

Рукопись поступила в издательский отдел  
21 августа 1981 года.