

УДК 536.62

Калориметр на основе термометра сопротивления

М. Д. Тарасов, А. В. Грунин,
М. А. Корочкин, М. А. Овчинников,
О. Н. Петрушин, Ю. А. Савельев,
М. Ю. Тараканов

Для дозиметрии тормозного излучения разработан калориметр на основе сплава алюминия. Регистрация поглощенной дозы осуществляется включенным в мост проволочным термометром сопротивления. Показано, что с использованием современной измерительной техники можно регистрировать средние значения доз от 0,1 Гр, что соответствует изменению температуры в датчике на 10^{-4} К.

В экспериментах на сильноточных ускорителях электронов используются калориметры, измеряющие нагрев металлических поглотителей под действием излучения. Датчиками температуры обычно являются термопары [1–3] или полупроводниковые термисторы [4, 5]. При прочих равных условиях калориметр на основе хромель-константановой термопары в десятки раз менее чувствителен, чем на основе проволочного сопротивления из никеля и в сотни раз менее чувствителен, чем полупроводниковый [6]. Настоящий калориметр предназначен для измерения дозовых характеристик ускорителей электронов ЛИУ-10М и ЛИУ-30 [7] с энергией тормозных квантов до 25 и 35 МэВ. В условиях облучения жесткими рентгеновскими квантами использование полупроводниковых датчиков температуры вызывает сомнение из-за наведенных дефектов структуры. Поэтому была выбрана конструкция датчика с проволочным термометром сопротивления.

Датчик (рис. 1) выполнен в виде катушки и цилиндра из сплава алюминия марки АД00, в котором Al занимает более 99,7 % общей массы [8]. Диаметр и высота катушки 40 мм. Катушка плотно прикрыта цилиндром ($\varnothing_{\text{внеш}}$ 50 мм) из того же сплава. Резьба на катушке выполнена по всей ее длине методом накатки с шагом 0,3 мм, глубиной 0,2 мм. Поверхность катушки и цилиндра покрыта слоем цапонлака толщиной несколько микрон. На катушку намотана проволока

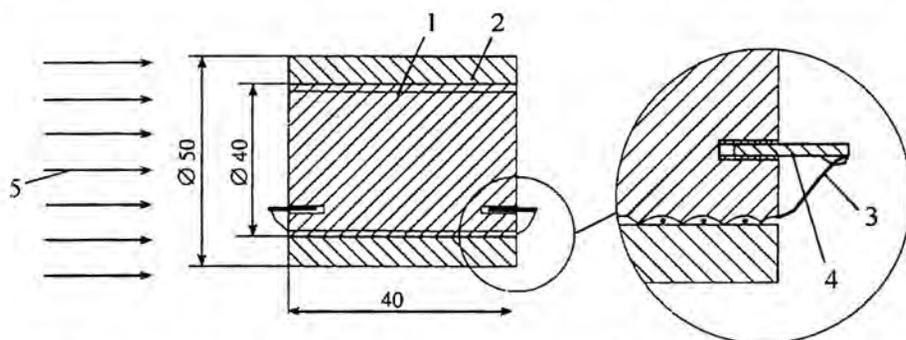


Рис. 1. Датчик калориметра: 1 – катушка; 2 – цилиндр; 3 – проволочный термистор; 4 – контакт; 5 – рентгеновское излучение

Ø 0,03 мм без изоляции из никелевого сплава НК02 длиной ~ 15 м и сопротивлением 2,096 кОм при температуре 291,7 К. Концы проволоки припаяны к изолированным от катушки выводам из константановой проволоки Ø 0,2 мм. Проволока на катушку наматывалась без натяжения, чтобы избежать изменения длины проволоки при температурном расширении катушки. Для обеспечения хорошего теплового контакта свободное пространство между катушкой, проволокой и цилиндром заполнено тонким слоем кремнийорганической теплопроводной пасты КПТ-8. Масса алюминия составляет >99,5 % общей массы рабочего тела датчика. На этом основании при расчете поглощенных доз использовалась теплоемкость чистого алюминия, данные по которой [9] аппроксимируются с ошибкой ± 1,5 % в диапазоне температур 173–573 К выражением

$$C_p(t), \text{ Дж/кг} = (T - 273)^2 \cdot 0,0024 + (T - 273) \cdot 1,39 + 840, \quad (1)$$

где $T, \text{ К}$ – температура.

Для теплоизоляции рабочее тело калориметра окружено пенопластом толщиной 0,02 м с плотностью 22 кг/м³. Пенопласт, являясь хорошим теплоизолятором, практически прозрачен для жестких рентгеновских квантов и примерно эквивалентен по поглощению алюминию толщиной 0,17 мм. На поверхности пенопласта расположен разъем, соединенный с выводами медной проволокой Ø 0,1 мм, оттоком тепла по которой можно пренебречь. Расположенный на дополнительной пенопластовой подставке в закрытом помещении датчик, нагретый на один градус, остывал со скоростью, не превышающей $\leq 10^{-5}$ К/с. Это позволило использовать низкочастотную измерительную аппаратуру для уменьшения наводок и электрических шумов.

Зависимость сопротивления датчика от температуры определялась путем многократного измерения сопротивления с помощью цифрового вольтметра HP34401F при медленном нагревании и охлаждении датчика. В результате в температурном диапазоне 283–295 К получено выражение

$$R(t) = R_0 [1 + \alpha_R (T - 273)], \quad (2)$$

где $\alpha_R = 4,47 \cdot 10^{-3} \pm 4 \cdot 10^{-5}$, К⁻¹ – температурный коэффициент сопротивления; $R_0 = 1,98 \pm \pm 0,01$ кОм.

Проволочное сопротивление включено в измерительный мост, три плеча которого выполнены из резисторов С2-29 с сопротивлением 2,1 кОм ± 0,05 %. Дисбаланс моста

$$E = (U/4) \alpha_R \Delta T, \quad (3)$$

где ΔT – разность температур датчика до и после облучения.

Подача на мост напряжения $U = 2,048$ В осуществляется прецизионным источником напряжения, выполненным на микросхеме REF191. В схеме регистрации дисбаланса моста используются измерительный усилитель и аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Усилитель собран на микросхеме AD524AR, имеющей коэффициент усиления 1000, подавление синфазной помехи 120 дБ, шумы на выходе 0,1 мкВ. АЦП I-7012 имеет 16 разрядов дискретизации, обслуживающих переключаемые диапазоны измерений, из которых наиболее чувствительный ± 0,15 В. Разность напряжений между ближайшими точками дискретизации 4,58 мкВ (4,58 нВ – величина, приведенная ко входу усилителя). АЦП через преобразователь интерфейса I-7520 связан с персональным компьютером. С его помощью производится запуск АЦП, чтение информации и вывод ее на экран монитора в виде непрерывно обновляющегося графика. Программа обеспечивает оцифровку сигнала с частотой 10 Гц и ниже.

Предположим, что чувствительность измерительной системы ограничена электрическими шумами аппаратуры. Эти шумы имеют приведенное ко входу усилителя амплитудное значение

0,3 мкВ. Для такого дисбаланса моста из (3) получаем $\Delta T = 1,31 \cdot 10^{-4}$ К, что измеримо с дискретностью $2 \cdot 10^{-6}$ К. С учетом $C_p = 867$ Дж/(кг·К) из зависимости (1) при $T = 293$ К это составляет 0,114 Гр. Верхнее значение измеренной дозы определяется работоспособностью датчика. Применяемую в датчике теплопроводную пасту рекомендуется использовать в диапазоне температур от 213 до 453 К. Для верхней границы этого диапазона доза превысит 100 кГр, что практически не достижимо на тормозном излучении импульсных ускорителей однократного действия.

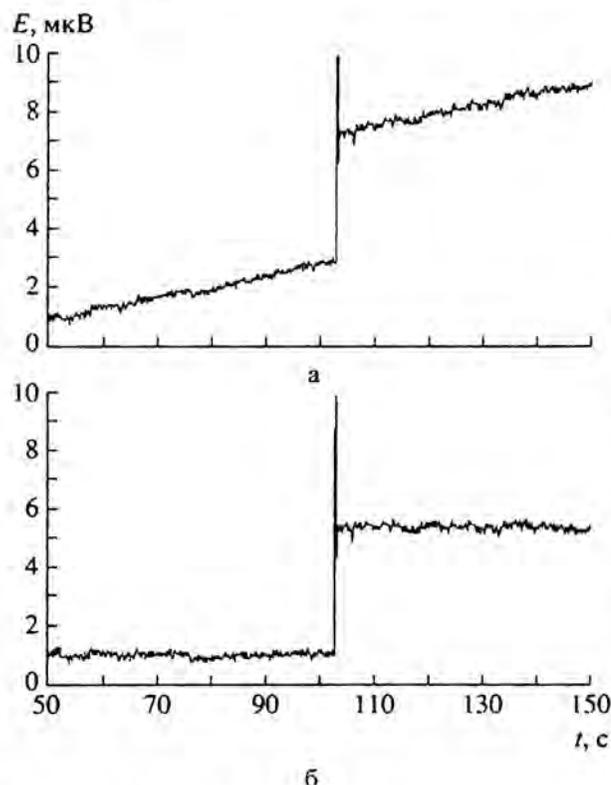


Рис. 2. Результаты эксперимента на ускорителе ЛПУ-30: а – импульс до обработки экспериментальных данных; б – после исключения постоянного нарастания дисбаланса моста

Если датчик расположить в помещении с постоянной температурой и включить питание измерительной системы за несколько секунд до импульса ускорителя, то нагрев датчика за счет протекания по проволоке тока приводит к нарастанию дисбаланса моста с квазипостоянной скоростью (рис. 2,а). В момент времени $t = 103$ с за счет нагрева в результате облучения происходит скачкообразный дисбаланс моста. Затем продолжается монотонный дисбаланс моста, как и до облучения. Если вычесть из экспериментальных значений напряжения дисбаланса моста $0,0375t - 0,9301$, то получим рабочий сигнал с датчика без постоянного нагрева (рис. 2,б).

Наличие информации по рабочим импульсам в цифровом виде позволяет вычислить среднее значение дисбаланса моста (\bar{E}), выбрав временные интервалы до и после облучения, когда теплообмен между датчиком и окружающей средой пренебрежимо мал. На временных интервалах 60–110 с и 110–150 с

$$\bar{E} = \bar{E}_1 - \bar{E}_2, \quad (4)$$

где \bar{E}_1 – среднее значение по 400 измерениям на временном интервале 110–150 с дисбаланса моста после облучения; \bar{E}_2 – то же на временном интервале 60–100 с до облучения (см. рис. 2,б).

Для эксперимента рис. 2,а,б без учета систематической погрешности получаем $\bar{E} = 4,37$ мкВ. Это соответствует изменению температуры на $1,92 \cdot 10^{-3}$ К или поглощенной дозе 1,66 Гр. Среднеквадратичная ошибка измерения составляет $S_n = \pm 0,146$ мкВ и не будет зависеть от \bar{E} при сохранении амплитудного и спектрального состава шумов. С вероятностью 0,95 значение E будет находиться в доверительном интервале

$$\Delta_E [\text{мкВ}] = S_n t_\alpha, \quad (5)$$

где t_α – коэффициент Стьюдента.

Для числа измерений одной величины $n > 20$ $t_\alpha = 2$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$ [10]. В процентах интервал (5) будет изменяться в зависимости от \bar{E} . Так, для $\bar{E} = 0,292$ мкВ (0,111 Гр) $\Delta_E = \bar{E} \pm 100\%$, а для $\bar{E} = 29,2$ мкВ (11,1 Гр) $\Delta_E = \bar{E} \pm 1\%$. В последнем случае ошибка

в определении дозы будет определяться в основном систематической погрешностью, которая тщательными калибровками величин C_p и α_R может быть доведена до нескольких процентов.

Излучение с малой проникающей способностью нагревает приповерхностный слой датчика. Этот нагрев будет точно измерен частью термометра сопротивления, что обеспечивает быстрое действие датчика в десятые доли секунды. На этом основании датчик может использоваться и для калориметрии пучков ускоренных электронов, а его высокая радиационная стойкость позволяет применять его и в нейтронных потоках. В качестве приемника излучения в датчике могут использоваться все металлы, находящиеся в твердом состоянии. Нагрев рабочего тела датчика за счет протекания по проволоке тока существенно уменьшается путем включения в мост балластного датчика.

Список литературы

1. Сучков В. П., Тарасов М. Д., Щербак Ю. П. Фольговый адиабатический калориметр // Приборы и техника эксперимента. 1987. № 5. С. 58–61.
2. Кротов А. Ю., Моргун О. Н., Черный В. В. Измерение спектра рентгеновского излучения, генерируемого в диоде сильноточного ускорителя // Там же. № 2. С. 15–20.
3. Степовик А. П., Хмельницкий Д. В. Диагностика мощных пучков электронов с помощью калориметров полного поглощения // ПМТФ. 2003. Т. 44, № 6. С. 4–11.
4. Филимончева П. И., Плохой В. В., Самойлова Л. Ю. и др. Метод спектрометрии мощных импульсных пучков электронов // Приборы и техника эксперимента. 1979. № 6. С. 40–43.
5. Pellinen D. G. Small combination X-ray calorimeters // Rev. Sci. Instrum. 1972. Vol. 43, N 8. P. 1181–1184.
6. Аш Ж., Андре П., Бофрон Ж. и др. Датчики измерительных систем. Кн. 1. Пер. с франц. М.: Мир, 1992.
7. Босамыкин В. С., Герасимов А. И., Гордеев В. С. Безжелезные линейные индукционные ускорители электронов – мощные генераторы коротких импульсов тормозного излучения // Сб. научных трудов РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров, 1997. С. 107–133.
8. Фридляндер И. Н., Каблов Е. Н., Сенаторова О. Г., Шалин Р. Е. Цветные металлы и сплавы, композиционные металлические материалы. Машиностроение. Энциклопедия в сорока томах. М.: Машиностроение, 2001. Т. II-3. С. 20.
9. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. М.: Атомиздат, 1968.
10. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974.

Calorimeter Based on Resistance Thermometer

M. D. Tarasov, A. V. Grunin, M. A. Korochkin, M. A. Ovchinnikov,
O. N. Petrushin, Yu. A. Saveliev, M. Yu. Tarakanov

A calorimeter based on aluminum alloy is developed to solve the tasks of bremsstrahlung dosimetry. A resistor connected with the bridge through a thin-wire thermometer realizes registration of absorbed dose. It is demonstrated that with the use of modern instrumentation one can register average values of doses beginning from 0.1 Gy what corresponds to 10^{-4} K variation of temperature in the sensor.