

УДК 533.9.08

ИМПУЛЬСНЫЙ БОЛОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СИЛЬНОТОЧНОМ X-ПИНЧЕ: РАСЧЁТ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕАЛИЗАЦИЯ

Ю.Л. Бакшаев, С.А. Данько, Е.Е. Соколов, К.В. Чукбар (НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия)

Представлено описание конструкции болометра из алюминиевой фольги и схемы измерений энергии мягкого рентгеновского излучения (МРИ). Проведены измерения энергии МРИ до 1 кэВ на сильноточном импульсном генераторе С-300 с помощью болометра с временным разрешением 19 и 300 нс, зарегистрирована полная энергия в несколько килоджоулей с энергией квантов до 1 кэВ. Болометр на основе фольги Al 8 мкм выдержал многократные пуски при токе 1,6—1,8 МА без изменения его сопротивления. На основе уравнения теплопроводности для «стержня» конечной длины проведены анализ временного разрешения болометра и оценки предельных тепловых нагрузок в зависимости от длительности импульса РИ.

Ключевые слова: управляемый термоядерный синтез, сильноточный X-пинч, измерение энергии мягкого рентгеновского излучения, фольговый болометр, уравнение теплопроводности, предельные тепловые нагрузки, схема измерений.

PULSED BOLOMETER FOR SOFT X-RAY RADIATION MEASUREMENT IN HIGH CURRENT X-PINCH: FORMULATION OF LIMITED PARAMETERS AND EMBODIMENT. Yu.L. BAKSHAEV, S.A. DAN'KO, E.E. SOKOLOV, K.V. CHUKBAR. The description of bolometer design made of aluminum foil and the scheme of the soft x-ray radiation energy measurements is presented. The measurements of soft x-ray energy in the range up to 1 keV on high current pulse generator S-300 are performed by means of bolometer with time resolution of 19 and 300 ns. The total energy of a few kilojoules of quantum energy interval of up to 1 keV has been registered. The bolometer on the basis of 8 μ Al foil survived a series of repeated shots at currents 1.6—1.8 MA without change of its resistance. Theoretical analysis for the time resolution of bolometer and the estimation of limiting thermal loads depending on pulse duration of x-ray based on the equation of heat conductivity for the rod with finite length are resulted.

Key words: controled nuclear fusion, high current X-pinch, measurement of energy of soft x-ray radiation, foil bolometer, the heat conductivity equation, limiting thermal loadings, the scheme of measurements.

ВВЕДЕНИЕ

В инерциальных термоядерных исследованиях наряду с измерениями спектра мягкого рентгеновского излучения (МРИ) измеряются его полная энергия и мощность, для чего служат различные детекторы (вакуумные и полупроводниковые диоды). Их общим недостатком является, как ни странно, высокая чувствительность, требующая для работы в линейной области удаления на расстояния в десятки метров и более или создания специальных ослабляющих устройств, например, использующих дифракцию на диафрагме с большим количеством малых отверстий [1]. Важным дополнением к этим приборам служат болометры с их худшим временным разрешением, но возможностью работы вблизи от источника излучения и отсутствием больших затрат при изготовлении. С их помощью можно независимо измерить энергию РИ в области мягких квантов и провести абсолютную калибровку других детекторов (например, вакуумных диодов).

Основной компонент болометра — очень тонкая металлическая фольга. Из-за своей малой толщины фольга под действием излучения заметно нагревается и её сопротивление повышается. Ход сопротивления болометра во времени, регистрируемый осциллографом, является функцией, по которой определяется энергия поглощённого излучения. В подобных экспериментах болометры регистрируют энергию рентгеновского излучения наносекундной длительности в диапазоне энергии квантов до нескольких кэВ. Приведём выдержки из научных публикаций, где описаны болометры, используемые в плазменных экспериментах на генераторах тока мегаамперного диапазона с длительностью импульса порядка сотен наносекунд и более.

В работе [2] описан открытый, свободно висящий болометр из полоски алюминиевой фольги толщиной 0,5—1 мкм для регистрации РИ с энергией квантов до 500 эВ. Импульс излучения длительностью ~100 нс и энергией 50—100 кДж генерировался при сжатии цилиндрического лайнера током 10 МА при напряжении 100 кВ. Болометр мог работать без разрушений до плотности мощности 10^7 Вт/см². Отмечено, что для применявшихся фольг не наблюдалось увеличение удельного сопротивления металла ρ , характерное для фольг толщиной менее 0,5 мкм.

В работе [3] описаны болометры из золота и никеля с толщиной фольги 1 мкм для измерения РИ на мощных импульсных генераторах SATURN и Z (Лаборатория Сандия, США). Заявленный временной отклик болометров ~ 1 нс, по нашим оценкам, кажется сильно уменьшенным. Авторы привели подробный анализ ошибок в измерениях электрических и механических величин, суммарная погрешность измерения энергии составила 10%.

Болометр из Лаборатории Сандия был использован для измерения мощности МРИ на установке COBRA в Корнельском университете с нагрузкой X-пинч при токе 1 МА [4]. Средняя энергия, делённая на число рентгеновских пиков, составила ~ 2 кДж, мощность — 20—25 ГВт. Время нарастания сигнала мощности ~ 20 нс существенно превосходит длительность узких пиков алмазных детекторов, которые экранированы фильтрами полного поглощения квантов с энергией до 1 кэВ и имеют полуширину ~ 2 нс.

В работе [5] вакуумными диодами и болометрами из медной полоски толщиной 2 и 15 мкм измерялись импульсы мягкого РИ мощностью ~ 1 ТВт и длительностью ~ 40 нс. Утверждается, что время выравнивания температуры для фольги толщиной 2 мкм составляет ~ 10 нс, что уже позволяет, по мнению авторов, отслеживать динамику поглощения излучения фольгой для указанной длительности импульсов РИ.

В работе [6] описан фольговый болометр на основе ниобиевой фольги с временным разрешением 2,5 мкс. Прибор был испытан на установке «Ангара-5-1» с выходом энергии излучения 50—100 кДж.

В данной работе приведено уравнение теплопроводности для «стержня» ограниченной длины, на основе которого выведены соотношения для временного разрешения болометра и предельных тепловых нагрузок на фольгу. Описана конструкция болометра на основе алюминиевой фольги толщиной 2 и 8 мкм с временным разрешением 19 и 300 нс соответственно. Представлены электрическая схема и результаты измерений болометром энергии РИ в диапазоне ниже 1 кэВ в экспериментах с нагрузками типа X-пинч на генераторе Стенд-300 с током до 1,8 МА.

КРИТЕРИИ КОНСТРУИРОВАНИЯ БОЛОМЕТРА

Для измерения энергии мягкого рентгеновского излучения на импульсных генераторах тока, где время жизни горячей плазмы составляет десятки наносекунд, необходимо удовлетворить ряд экспериментальных требований:

1. Временное разрешение болометра должно позволить провести измерение энергии мягкого рентгеновского излучения до попадания на детектор вещества быстро разлетающейся плазмы;
2. Чувствительный элемент болометра не должен повреждаться ни под действием поглощённого излучения, ни вследствие нагрева опорным током;
3. Погрешность проводимых измерений энергии РИ не должна превышать требуемой в эксперименте величины, например 10%.

Известны два противоречивых аспекта при выборе толщины фольги: с увеличением толщины фольги увеличиваются ширина измеряемого спектрального диапазона и время установления теплового равновесия. Стремление работать с ультратонкими фольгами оправдано с точки зрения быстрого прогрева фольги, при котором можно регистрировать не только падающую энергию, но и мощность излучения. Но, как упоминалось [2], имеется существенное отклонение удельного сопротивления ρ и его температурного хода от табличных значений для очень тонких фольг вследствие нерегулярности структуры металла, что приводит к ошибкам измерений. Изготовление регулярных плёнок, напыляемых на подложки с низкой теплопроводностью, требующих специальной техники напыления и калибровки, пригодно для измерений в длинноволновой области рентгеновского спектра, например, в некоторых лазерных экспериментах [7].

Ожидаемая величина излучённой энергии составляет несколько килоджоулей. Чтобы фольга не повреждалась под действием излучения, выбирались достаточные размеры (толщина) образца и расстояние до источника. В условиях паразитных электромагнитных наводок, имеющих уровень $\sim 0,1$ В, уверенно измеряемая осциллографом величина напряжения составляет $\sim 0,5$ В и даже ниже, если использовать математическую обработку сигналов. В условиях эксперимента на Стенде-300 требование пункта 3 выполняется при полезном сигнале напряжения на болометре ~ 1 В.

УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

В работе [8] для оценки времени прогрева фольг было использовано фундаментальное решение уравнения теплопроводности, приведённое в работе [9] для случая стержня бесконечной длины. Представим стандартное решение уравнения теплопроводности для фольги (стержня) конечной толщины d , которое позволяет определить временное разрешение в каждом конкретном случае:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = Q\delta_+(x)\delta(t), \quad 0 \leq x \leq d, \quad (1)$$

где приграничное энерговыделение в пренебрежимо тонком (в сравнении с d) слое за пренебрежимо малое время смоделировано комбинацией двух дельта-функций в правой части. Его следует дополнить условием непротекания тепла через границу, обеспечивающим сохранение суммарного тепла в течение всего процесса:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0,d} = 0 \quad \rightarrow \quad \int_0^d T(x, t) dx = Q$$

(температура, естественно, отсчитывается от исходного фона). Таким образом, Q представляет собой плотность падающей энергии излучения, нормированную на ср. Решение (фактически функция Грина уравнения) представимо в «двойном» виде как самой функции, так и её ряда Фурье, связь между которыми носит название формулы инверсии Пуассона:

$$T(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi\chi t}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(x+2dn)^2}{4\chi t}\right] \frac{Q}{d} \left\{ \frac{1}{2} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi x}{d} \exp\left[-\left(\frac{n\pi}{d}\right)^2 \chi t\right] \right\}. \quad (2)$$

При малом времени $\chi t \ll d^2$ удобен первый ряд — можно принимать во внимание не более трёх его членов, при большом времени (удовлетворяющем противоположному неравенству) по аналогичным соображениям — второй. Однако вследствие очень быстрого убывания экспонент с большим отрицательным показателем для любого разумного времени достаточно учесть лишь члены с $|n| \leq 5$ любого ряда.

При $\chi t > (d/\pi)^2$ уже с 5%-ной точностью во второй сумме можно оставить только член с $n = 1$. Это неравенство справедливо для алюминиевой фольги толщиной 2 мкм при $t > 5$ нс, а толщиной 8 мкм — при $t > 80$ нс. Считая его выполненным, получим разницу температур в точках x_1 и x_2 , которая равна

$$\Delta T(x_2 - x_1, t) = \frac{2Q}{d} \exp\left[-\left(\frac{\pi}{d}\right)^2 \chi t\right] \left(\cos \frac{\pi x_2}{d} - \cos \frac{\pi x_1}{d} \right).$$

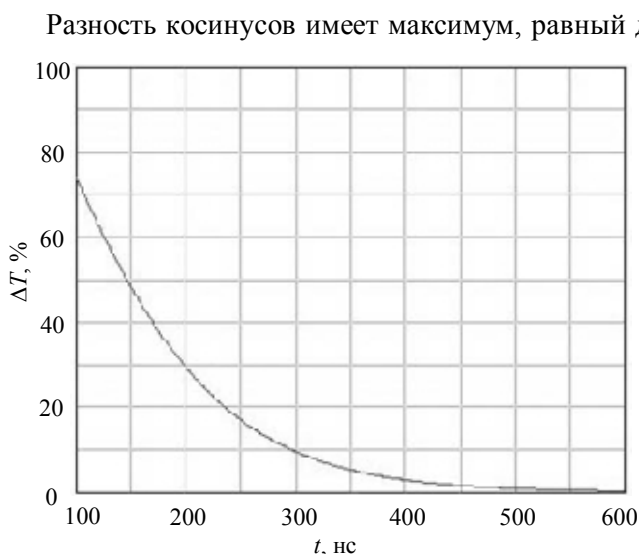


Рис. 1. Разность температур на двух поверхностях алюминиевой полоски размером 8 мкм в процентах к конечной равновесной температуре

Разность косинусов имеет максимум, равный двойке при $x_2 = 0$ и $x_1 = d$, т.е. для краёв фольги. Поскольку равновесное значение температуры $T_\infty = Q/d$, эта относительная разница получается в виде

$$\frac{\Delta T}{T_\infty} = 4 \exp\left[-\left(\frac{\pi}{d}\right)^2 \chi t\right]. \quad (3)$$

При выборе 10%-ной погрешности установления температурного равновесия, т.е. $\Delta T < 0,1T_\infty$, получаем оценку по времени $t > 0,375d^2/\chi$.

Коэффициент теплопроводности алюминия $\chi = 0,8$ см²/с. Для толщины фольги $d_1 = 2$ мкм время установления равновесной температуры составит $t_1 = 19$ нс. Для толщины фольги $d_2 = 8$ мкм $t_2 = 300$ нс. В качестве иллюстрации на рис. 1 представлена зависимость относительной разности температур фольги на «концах стержня» для 8-микронной фольги.

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ

При создании болометра требуется расчёт предельной мощности излучения, падающей на его поверхность. Чем быстрее прогревается материал датчика, тем меньше вероятность кипения поверхностного слоя, которое накладывает ограничение на многократное использование датчика.

На рис. 2 приведена зависимость длины пробега квантов в алюминии δ от энергии фотонов в диапазоне 50—2000 эВ [10]. Оксидной плёнкой на поверхности алюминия в приведённых далее расчётах пренебрегалось, поскольку толщина оксидной плёнки на только что раскатанном листе алюминия 2,5 нм и за несколько лет её толщина может достигнуть в воздушной среде при комнатной температуре 10—20 нм (см., например, http://masterweld.ru/svarka_aluminiya). Измерения электропроводности промышленной фольги дают значение, также соответствующее чистому алюминию. Отметим, что наиболее критическая ситуация наблюдается в диапазоне энергии квантов 75—200 эВ, где длина пробега составляет величину менее 0,05 мкм. Но благодаря высокой теплопроводности алюминия и конечной длительности импульса РИ тепло во время излучения успевает распространиться на большую толщину. Поэтому для определения максимальных температур, достигаемых в процессе поглощения квантов фольгой, необходим учёт конечности времени импульса излучения τ , а вот глубиной энерговыделения можно пренебрегать, поскольку в наших условиях она удовлетворяет неравенству $\delta^2 \ll \chi\tau$. Это значит, что в правой части уравнения теплопроводности происходит замена

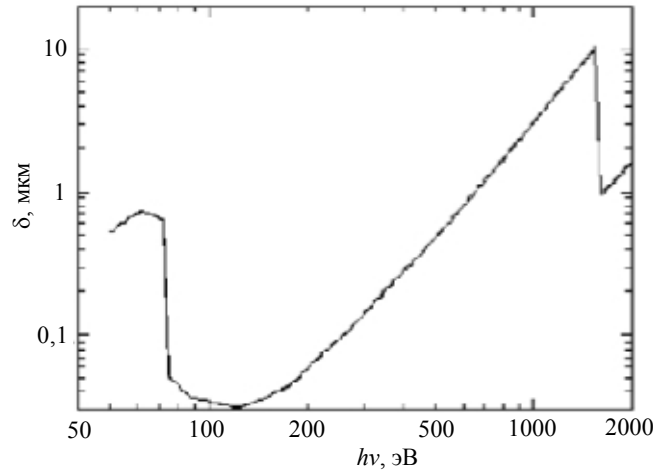


Рис. 2. Длина пробега МРИ в алюминии

$\delta(t) \rightarrow f(t)$, где функция $f(t)$ заметно отличается от нуля лишь при $0 < t < \tau$ и $\int_0^\infty f(t)dt = 1$.

Поскольку в обсуждаемых экспериментальных ситуациях выполняется также неравенство $\chi\tau \ll d^2$, то можно положить $d \rightarrow \infty$ и оставить в выписанной функции Грина лишь член первого ряда с $n = 0$, т.е. свести задачу к прогреву полубесконечного стержня (фольги). Ответ: новый профиль $T(x, t)$, как известно, даётся свёрткой по времени функции Грина с $f(t)$. Так как температурный максимум в этой модели, очевидно, достигается при $x = 0$, нам достаточно интересоваться поведением лишь $T(0, t)$, которое оказывается связанным с временным профилем импульса излучения $f(t)$ через интеграл дробного порядка 1/2:

$$T(0, t) = \frac{Q}{\sqrt{\chi}} \mathfrak{I}_{1/2}[f(t)]; \quad T(0, t) = \int_0^t \frac{Qf(t')dt'}{\sqrt{\chi\pi(t-t')}}$$

(этимология термина связана с тем, что лаплас-образы функций удовлетворяют соотношению $T_p(0) = Qf_p/\sqrt{\chi p}$). От степенных функций эти интегралы берутся по простой схеме

$$\mathfrak{I}_{1/2}[t^\alpha] = \frac{\Gamma(\alpha + 1)}{\Gamma(\alpha + 3/2)} t^{\alpha+1/2},$$

поэтому реальные $f(t)$ удобно аппроксимировать комбинациями именно таких функций. Например, резкие или плавные «включение» и «выключение» источника тепла можно моделировать ступенькой или параболой соответственно:

$$f_1(t) = \frac{Q}{\tau} \begin{cases} 1, & t < \tau \\ 0, & t > \tau \end{cases}; \quad f_2(t) = \frac{6Q}{\tau^3} \begin{cases} t(\tau - t), & t < \tau \\ 0, & t > \tau \end{cases},$$

для которых при $t < \tau$

$$T_1(0, t) = \frac{2Q}{\sqrt{\pi\chi}} \frac{t^{1/2}}{\tau}; \quad T_2(0, t) = \frac{8Q}{\sqrt{\pi\chi}} \frac{t^{3/2}(\tau - 4t/5)}{\tau^3}.$$

В первом варианте максимум температуры достигается при $t = \tau$, во втором — при $t = 3\tau/4$, причём для его величины получаются следующие выражения:

$$T_{1\max} = 2 \frac{Q}{\sqrt{\pi\chi\tau}}; \quad T_{2\max} = \frac{6\sqrt{3}}{5} \frac{Q}{\sqrt{\pi\chi\tau}}$$

с отличием лишь в 4%. Ответ может быть записан и через асимптотически устанавливающуюся конечную температуру фольги $T_\infty = Q/d$, т.е. с хорошей точностью $T_{\max} \approx 2dT_\infty/\sqrt{\pi\chi\tau}$ для достаточно произвольных $f(t)$ описанного типа.

Если длительность импульса излучения достаточно велика ($d^2 \approx \chi\tau$), то сведение к полубесконечной задаче не проходит и связь между лаплас-образами становится более сложной:

$$T_p(0) = \frac{Qf_p}{\sqrt{\chi\rho}} \coth \sqrt{\frac{pd^2}{\chi}},$$

и простых формул подобрать не удаётся.

В рамках выполнения неравенства $d^2 \gg \chi\tau$, используя выписанные формулы, получаем зависимость предельной энергии и интенсивности излучения от длительности прямоугольного импульса РИ для алюминиевой фольги толщиной 2 мкм и площадью $s = 0,3 \text{ см}^2$, доводя максимальную температуру $T_{\max} = 2100 \text{ °C}$ почти до температуры кипения $T_{\text{кип}} = 2330 \text{ °C}$ (рис. 3).

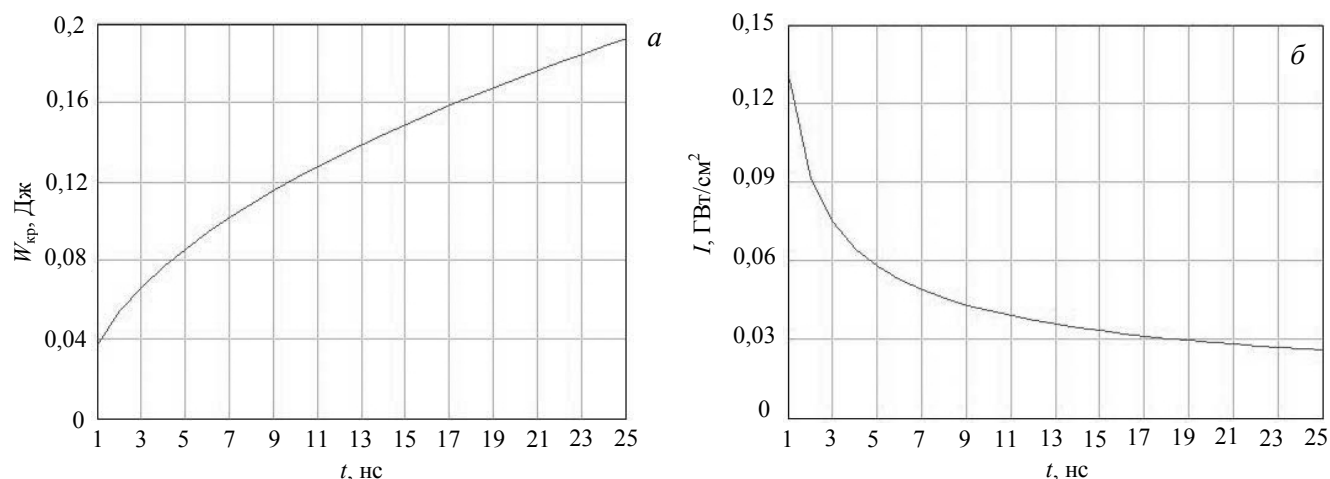


Рис. 3. Зависимость предельной энергии (а) и интенсивности излучения (б) от длительности импульса для алюминиевой фольги толщиной 2 мкм и площадью $0,3 \text{ см}^2$

Предельная плотность энергии $W_{\text{кр}}$ для источника при длительности импульса $\tau = 1 \text{ нс}$ составляет $0,12 \text{ Дж/см}^2$. Предельная интенсивность $I_{\text{кр}}$ составляет $\sim 130 \text{ МВт/см}^2$ (в экспериментах достижимо и меньшее время [11]). Приведённая в работе [2] экспериментальная величина предельной интенсивности для болометра на основе алюминиевой фольги толщиной $0,5\text{—}1 \text{ мкм}$ при $\tau = 100 \text{ нс}$ составила 10 МВт/см^2 , что неплохо соответствует оценке по приведённым формулам, составляющей 13 МВт/см^2 , несмотря на то, что в этом случае $8d^2 \sim \chi\tau$ и формула уже не обязана работать.

Расчёты показывают, что нагрев импульсным опорным током в нашем случае не играет существенной роли в тепловой нагрузке фольги.

ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА СТЕНДЕ-300

Для определения энергии источника W_x по относительному изменению сопротивления фольги R в результате её нагрева излучением при постоянном токе через болометр имеем

$$\Delta U/U_0 = \Delta R/R_0 = \alpha\Delta T = \alpha W_x s / (4\pi L^2 C m).$$

Здесь $\Delta U/U_0$, $\Delta R/R_0$ — относительное изменение напряжения и сопротивления соответственно; ΔT — установившееся по толщине изменение температуры фольги под действием излучения; m — масса

фольги; C — удельная теплоемкость фольги, Дж/г/град; α — температурный коэффициент сопротивления; W_x — энергия источника РИ, Дж; s — площадь образца, на которую падает излучение, см²; L — расстояние от источника до болометра, см. Энергия

$$W_x = 4\pi L^2 C \rho d / \alpha (\Delta U / U_0), \tag{4}$$

где d — толщина; ρ — плотность фольги.

Согласно формуле (3) для снижения времени прогрева при равной толщине следует отдавать предпочтение материалам с большей температуропроводностью $\chi = k/C\rho$, где k — коэффициент теплопроводности, — Cu, Al, W, Au, Mo.

По формуле (4) в соответствии с ожидаемой на генераторе С-300 величиной излучённой энергии 0,1—1 кДж и уровнем электромагнитных наводок ~0,1 В можно подобрать оптимальный материал и конструкцию болометра.

Т а б л и ц а 1. Выбор материала по температуропроводности χ и температурному коэффициенту сопротивления α

| № п/п | Материал | ρ , г/см ³ | k , Дж/(см·с·град) | χ , см ² /с | α , град ⁻¹ |
|-------|----------|----------------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 | Al | 2,7 | 2,1 | 0,8 | 0,0036 |
| 2 | Ti | 4,5 | 0,21 | 0,09 | 0,003 |
| 3 | Fe | 7,9 | 0,67 | 0,19 | 0,005 |
| 4 | Ni | 8,8 | 0,59 | 0,16 | 0,0054 |
| 5 | Cu | 8,9 | 3,85 | 1,09 | 0,004 |
| 6 | Mo | 10,1 | 1,45 | 0,56 | 0,0047 |
| 7 | Ta | 16,6 | 0,54 | 0,24 | 0,0031 |
| 8 | W | 19,34 | 2,01 | 0,76 | 0,0052 |
| 9 | Au | 19,31 | 2,93 | 1,19 | 0,0036 |

На рис. 4 приведены расчётные прямые, по которым можно легко определить установившуюся температуру фольги по рассчитанной энергии при измеренном скачке напряжения в экспериментах при рабочих параметрах болометра: толщина фольги Al 8 мкм, длина 15 мм, ширина 1,7 мм.

ОПИСАНИЕ СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАПУСКИ

Для измерения скачка сопротивления датчика под действием нагрева излучением использовалась электрическая схема, подобная описанной в работе [2]. На рис. 5 приведена схема LCR-контура, в цепь которого был включён образец с алюминиевой фольгой. Схема была заключена в экранирующий кожух. Два конденсатора типа ФГТИ общей ёмкостью $C = 0,1$ мкФ, соединённых в параллель, были подключены через высоковольтный разрядник типа РУ-62 к индуктивности $L = 40$ мкГ с сопротивлением 2,5 Ом и резисторам $R1$ и $R2$ типа ТВО-0,25 величиной 1 Ом. Волновое сопротивление контура 20 Ом. Последовательно с резисторами был включён измерительный элемент болометра в виде полоски толщиной 2 мкм и рабочей поверхностью 2×15 мм, который вторым концом был подсоединён к корпусу. Измерительный элемент RB был смонтирован на подложке из стеклотекстолита в корпусе стандартного ВЧ-делителя с рабочим разъёмом типа СР-50-73ФВ. Расчётное сопротивление полоски составляло 106 мОм.

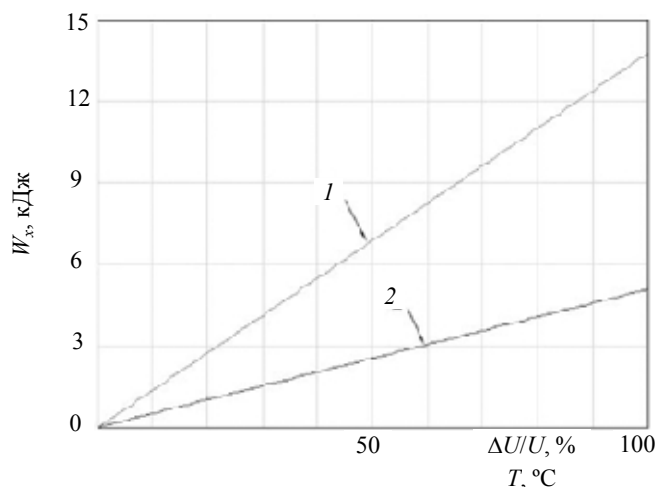


Рис. 4. Диаграмма зависимости относительного изменения напряжения (1) и ожидаемой температуры фольги (2) от энергии РИ

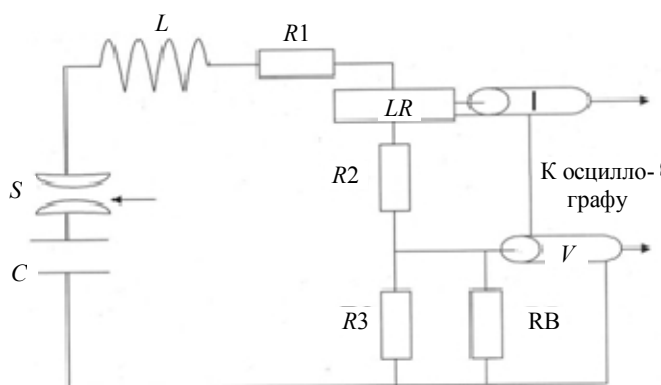


Рис. 5. Блок-схема измерений электрических сигналов

Полоска фольги была зашунтирована резистором $R3 = 1$ Ом для защиты осциллографа в случае её перегрева и разрушения. В крышке делителя была сделана прорезь 5×20 мм для приёма излучения. Ток в контуре измерялся поясом Роговского в режиме трансформатора тока (RL на схеме).

Сигнал с датчика снимался с тройника, подключенного к правому разъёму в корпусе болометра. Другой конец тройника служил для подачи тока на датчик (рис. 6). Левый разъём не был задействован и мог служить для раздельного подключения входного и выходного сигналов без использования тройника.

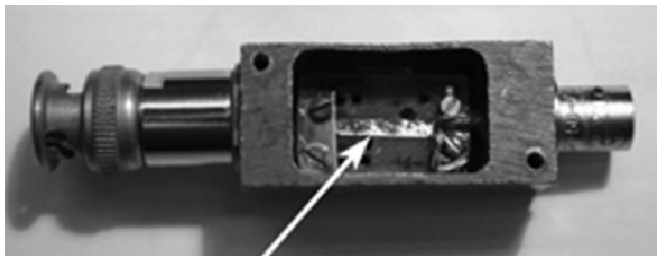


Рис. 6. Фотография болометра с открытой крышкой. Стрелкой показана фольга

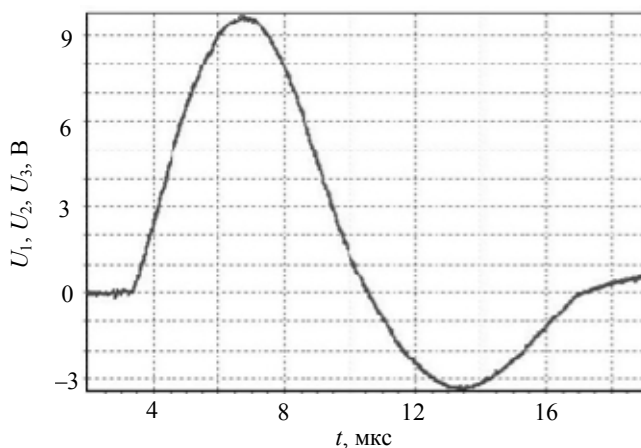


Рис. 7. Сигналы с датчика. Три последовательных пуска

С учётом измеренного декремента затухания ток в первом максимуме должен составить ~ 90 А. По измерениям пояса Роговского он близок к этому значению и равен 84 А. Следует отметить полное совпадение всех сигналов в ряде последовательных пусков, что говорит о стабильности условий измерений (рис. 7). По кривым рис. 7 можно видеть, что реальный декремент затухания выше расчётного примерно в два раза, что играет положительную роль в снижении температурной нагрузки на фольгу. Причиной увеличения декремента затухания могут быть активные потери в разряднике. Нагрев же провода катушки индуктивности составляет доли градуса. В процессе испытаний с разными фольгами из алюминия было замечено, что напряжение на образце выше расчётного, что можно объяснить включаемыми в измерения сопротивлениями контактов.

Их влияние зависит от качества сборки и должно учитываться для каждого образца отдельно. Отклонение измеренного сопротивления в ряде случаев не превышало 10% от расчётного.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Как следует из работы [12], мягкое излучение с энергией квантов ниже 1 кэВ в экспериментах с X-пинчем исследовалось мало. Именно ему было уделено основное внимание в наших экспериментах с X-пинчем. Болометр с алюминиевой фольгой толщиной 2 или 8 мкм располагался на расстоянии 45 см от источника при токах через нагрузку 1,5—1,7 МА. Можно измерять излучение с энергией квантов, не превышающей 850 эВ для фольги толщиной 2 мкм и 3,5 кэВ — для 8 мкм. Измерения проводились с открытым болометром, а также с разными фильтрами из лавсана толщиной 2,5 мкм или 12 мкм с напыленным слоем алюминия толщиной 0,05 мкм. В табл. 2 представлены основные результаты измерений.

Т а б л и ц а 2. Основные экспериментальные данные

| № пуска | Нагрузка | Масса, мг/см | Ток, МА | Напряжение, МВ | Параметры фольги | Энергия РИ, кДж | Примечания |
|---------|----------------------------|--------------|---------|----------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| 1 | Нихром, 4×100 мкм | 2,51 | 1,7 | 0,26 | $d = 2$ мкм, $s = 4 \times 15$ мм | 3,1 | Щель — 4,5 мм |
| 2 | Нихром, 4×100 мкм | 2,64 | 1,6 | 0,15 | $d = 2$ мкм, $s = 4 \times 15$ мм | 0 | Щель — 4,5 мм Лавсан — 12 мкм |
| 3 | Нихром, 4×100 мкм | 2,64 | 1,5 | 0,34 | $d = 2$ мкм, $s = 4 \times 15$ мм | 5,4 | Открытый болометр |
| 4 | Нихром, 16×55 мкм | 3,04 | 1,76 | 0,32 | $d = 8$ мкм, $s = 1,7 \times 15$ мм | 0 | Щель — 4,5 мм Лавсан — 2,5 мкм |
| 5 | Нихром, 36×55 мкм | 6,8 | 1,76 | 0,29 | $d = 8$ мкм, $s = 1,7 \times 15$ мм | 8,4 | Открытый болометр |
| 6 | Нихром, 24×55 мкм | 4,5 | 1,6 | 0,35 | $d = 8$ мкм, $s = 1,7 \times 15$ мм | 5,8 | Открытый болометр |

В качестве примера на рис. 8 приведены два сигнала напряжения на алюминиевой фольге толщиной 8 мкм с источником РИ и без него (шестой номер пусков в табл. 2).

Влияние сопротивления контактов на измерения было учтено по отклонению величины напряжения от расчётного в предварительном пуске. Зная величину тока и сопротивления фольги, U_0 в формуле (4) рассчитывалось в каждом пуске. По отклонению показаний в максимуме напряжения и с учётом сопротивления контактов энергия источника составила в данном пуске 5,8 кДж. Пуск № 3 с 2 мкм фольгой при энергии 5,4 кДж продемонстрировал невозможность многократного использования фольги с такой толщиной из-за частичных повреждений, связанных, возможно, с последующей механической нагрузкой фольги потоками продуктов электрического взрыва нагрузки. Поэтому в последующих измерениях использовался болометр с фольгой размером 8 мкм. Важный вывод можно сделать на основании того, что при работе с фильтрами из майлара, закрывавшими прорез в крышке датчика, приращения сигнала напряжения с болометра не наблюдалось при толщине фольги как 2, так и 8 мкм. Следовательно, основная доля энергии МРИ заключена в диапазоне до 1 кэВ и, скорее всего, излучается более длительное время, чем длительность существования «горячих точек». Эта энергия на несколько порядков выше энергии, излучаемой из «горячих точек». Так численные расчёты для двух молибденовых проволочек оценивают энергию РИ из «горячих точек» как 0,1—0,2 Дж [11]. Испытания болометра с разной толщиной фольг показали устойчивую работу прибора и дали полезный опыт для совершенствования конструкции прибора. На рис. 9 приведён фотоснимок расположения закрытого датчика рядом с входным отверстием диагностической трубы.

Обсуждая возможное влияние побочных эффектов, искажающих измерения, отметим следующее:

— принимая величину максимальной скорости разлёта горячей плазмы $v_{\text{макс}} \sim 10^7$ см/с при расстоянии до источника 45 см, получаем время пролёта плазмы до болометра 4,5 мкс, что существенно больше временного разрешения нашего болометра;

— потеря энергии за счёт фотоэффекта очень мала и составляет ~1%, поскольку квантовый выход фотоэлектронов не превышает 0,1 при средней энергии эмитированных электронов ~4 эВ [13]. Кроме того, регистрация энергии МРИ вблизи максимума проходящего через болометр тока позволяет использовать его собственное магнитное поле для возвращения вылетевших электронов обратно на фольгу. Ларморовский радиус для нашего случая составляет ~0,3 мм, что существенно меньше длины фольги 15 мм;

— влияние отражения фотонов от фольги в измеряемом диапазоне также незначительно. На рис. 10 приведён коэффициент отражения фотонов от поверхности алюминия с длиной волны меньше 400 нм;

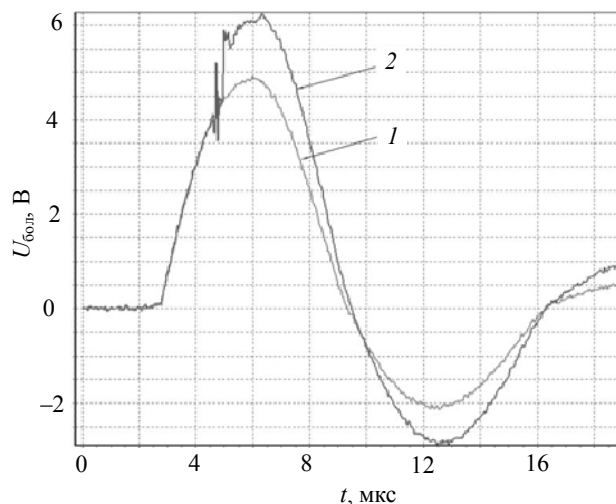


Рис. 8. Контрольный (1) и рабочий (2) сигналы напряжения на болометре. Нагрузка: 24 проволочки из нихрома диаметром 55 мкм; ток — 1,6 МА; напряжение — 0,35 МВ; энергия источника МРИ — 5,8 кДж

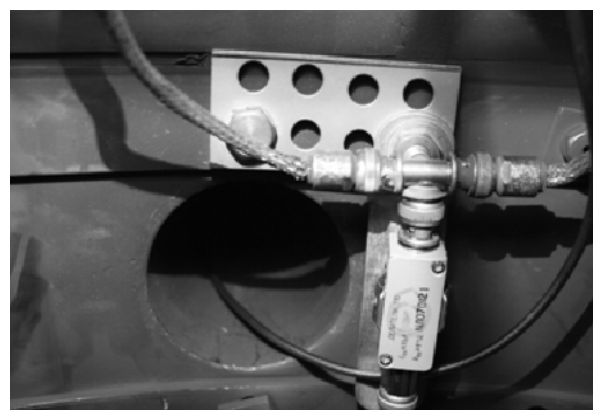


Рис. 9. Фотография болометра с закрытой крышкой в вакуумной камере

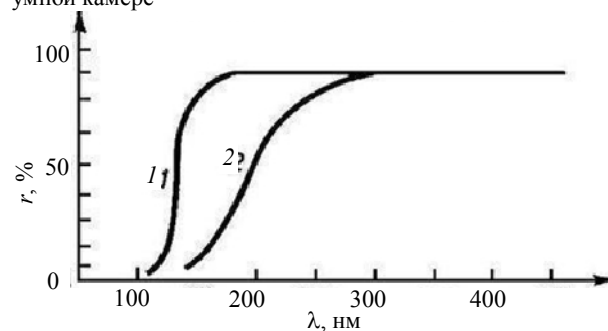


Рис. 10. Зависимость коэффициента отражения r (в процентах) от длины волны (нм) для чистого алюминия (1) и алюминия с примесью других элементов (2)

— следует отметить, что для исключения влияния на регистрируемый сигнал рассеянных от конструктивных элементов экспериментального стенда и самого болометра рентгеновских квантов следует использовать диафрагмы, коллиматоры и т.п.

ВЫВОДЫ

Описаны конструкция болометра с высоким временным разрешением на основе алюминиевых фольг толщиной 2 и 8 мкм и схема измерений, которые могут быть воспроизведены без существенных затрат, обеспечив измерение энергии излучения в широком рентгеновском диапазоне квантов до 1 кэВ в импульсных плазменных экспериментах. Временное разрешение прибора 19 и 300 нс соответственно для указанных толщин позволяет провести измерения до прилёта потоков плазмы и микрочастиц, способных исказить результаты измерений.

Приведено решение уравнения теплопроводности для стержня ограниченной длины, на основе которого в общем виде выведены простые соотношения для временного разрешения прибора и предельных тепловых нагрузок на фольгу. Показано, что временное разрешение болометра в несколько раз (~6) лучше, чем по оценке для полубесконечного стержня. Мощность излучения, которая не разрушает болометр при неизменной полной регистрируемой энергии, с укорочением длительности импульса многократно увеличивается.

На генераторе С-300 проведены интегральные измерения энергии МРИ в интервале энергии квантов до 1 кэВ с помощью болометра с временным разрешением. Динамический диапазон регистрации поверхностной плотности энергии составлял 0,04—0,4 Дж/см². Основная доля энергии МРИ, излучаемой *x*-пинчем, заключена в диапазоне до 1 кэВ и, скорее всего, излучается большее время, чем длительность существования «горячих точек» [4]. Болометры с разной толщиной фольг показали устойчивую работу в контрольных пусках. Болометр с фольгой размером 8 мкм в экспериментах многократно выдерживал нагрев измеряемым излучением без изменения сопротивления.

Авторы выражают искреннюю благодарность Ю.Г. Калинину за внимание к работе и ценные замечания, а также С.С. Ананьеву за помощь в работе.

Работа поддержана грантами РФФИ № 08-02-01102 и № 08-02-00993 и грантом Президента РФ НШ-6536.2010.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ives H.C., Stygar W.A., Fehl D.L. et al. — Phys. Rev. Special Topics — Accelerators and Beams, 2006, vol. 9, p. 110401.
2. Degnan J.H. Fast, large-signal, free-standing foil bolometer for measuring ultrasoft *x*-ray burst fluence. — Rev. Sci. Instrum., 1979, vol. 50, p. 1223—1226.
3. Spielman R.B., Deeney C., Fehl D.L. et al. Fast resistive bolometry. — Rev. Sci. Instrum., 1999, vol. 70, p. 651—655.
4. Sinars Daniel B. 1 MA *X*-pinch experiments at Cornell University. — In: Wire Array Work shop. Battle, UK, Sandia, 2007 (unpublished).
5. Сорокин С.А., Чайковский С.А. Измерение мощности и спектрального распределения излучения плазменных лайнеров. — ЖТФ, 2000, т. 70, с. 78—81.
6. Волков Г.С., Лахтюшко Н.И., Терентьев О.В. Фольговый радиационный болометр для измерения энергетических потерь плазмы быстрых *Z*-пинчей. — В сб.: Тезисы докладов 37-й Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, 2010, с. 161.
7. Contreras B., Gaddy O.L. Nanosecond response time room-temperature infrared detection with thin-film bolometers. — Appl. Phys. Lett., 1970, т. 17, p. 450—453.
8. Бакшаев Ю.Л., Данько С.А., Соколов Е.Е. Импульсный болометр для измерения энергии рентгеновского излучения: Препринт ИАЭ, 2010.
9. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. — М.—Л.: ГИТТЛ, 1951, гл. 3, с. 216.
10. <http://www-cxro.lbl.gov>.
11. Розанов В.Б., Иванов Е.М., Гуськов С.Ю. и др. Характерные спектры излучения лазерной и разрядной плазмы: Препринт ФИАН, 2003.
12. Пикуз С.А. Докторская диссертация, 2007, гл. 5.
13. Day R.H. — In: Low Energy *x*-ray Diagnostics. Monterey, 1981; AIP Conf. Proc. № 75, ISBN 0-88318-174-6; DOE Conf. 810651, IC Catalog Card № 81-69841. Ed. by D.T. Attwood and B. L. Henke. Published by American Institute of Physics, New York, 1981.

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2010 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2011, вып. 1, с. 54—62.